



**SKRIPSI – TK141581**

**SIMULASI DAN PEMODELAN ABSORPSI CO<sub>2</sub> & H<sub>2</sub>S  
DALAM LARUTAN MDEA DENGAN PROMOTOR  
PIPERAZINE (PZ) MENGGUNAKAN *TRAY COLUMN***

**Oleh:**

**Naufal Hilmy Alhady**

**NRP. 2314106022**

**Mochammad Yoga Arifin**

**NRP. 2314106029**

**Dosen Pembimbing:**

**Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S.**

**NIP. 1951 08 04 1974 12 1001**

**Dr. Ir. Susianto, DEA.**

**NIP. 1962 08 20 1989 03 1004**

**LABORATORIUM PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA  
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2017**



**FINAL PROJECT – TK141581**

**MODELING AND SIMULATION CO<sub>2</sub> & H<sub>2</sub>S  
ABSORPTION IN MDEA SOLUTION WITH  
PROMOTER PIPERAZINE (PZ) USING THE TRAY  
COLUMN**

**Proposed by:**

**Naufal Hilmy Alhady**

**NRP. 2314106022**

**Mochammad Yoga Arifin**

**NRP. 2314106029**

**Advisor :**

**Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S.**

**NIP. 1951 08 04 1974 12 1001**

**Dr. Ir. Susianto, DEA.**

**NIP. 1962 08 20 1989 03 1004**

**HEAT AND MASS TRANSFER LABORATORY  
DEPARTEMENT OF CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA 2017**

## LEMBAR PENGESAHAN

### **SIMULASI DAN PEMODELAN ABSORPSI CO<sub>2</sub> & H<sub>2</sub>S DALAM LARUTAN MDEA DENGAN PROMOTOR PIPERAZINE (PZ) MENGGUNAKAN *TRAY COLUMN***

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kimia  
Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya

Oleh:

Naufal Hilmy Alhady


NRP: 2314106022

Mochammad Yoga Arifin

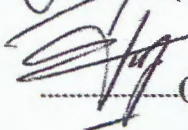
NRP: 2314106029

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

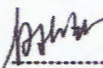
1. Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S.

 (Pembimbing 1)


2. Dr. Ir. Susianto, DEA

 (Pembimbing 2)

3. Prof. Dr. Ir. H.M. Rachimoellah, Dipl. EST

 (Penguji 1)

4. Prof. Ir. Renanto, M.Sc., Ph.D.

 (Penguji 2)



Surabaya, Januari 2017

**SIMULASI DAN PEMODELAN ABSORBSI CO<sub>2</sub> & H<sub>2</sub>S  
DALAM LARUTAN MDEA DENGAN PROMOTOR  
PIPERAZINE (PZ) MENGGUNAKAN *TRAY COLUMN***

**Nama** : 1. Naufal Hilmy Alhady  
2. Mochammad Yoga Arifin  
**NRP** : 1. 2314106022  
2. 2314106029

**Pembimbing 1** : Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S.

**Pembimbing 2** : Dr. Ir. Susianto, DEA.

***ABSTRAK***

Pengambilan H<sub>2</sub>S dan CO<sub>2</sub> dalam gas alam adalah merupakan proses yang paling penting dalam pemanisan gas alam. H<sub>2</sub>S merupakan gas korosif apabila bercampur dengan *moisture* dan CO<sub>2</sub> yang lepas dari sistem dan keluar ke atmosfer akan menyebabkan efek rumah kaca. CO<sub>2</sub> dapat menurunkan nilai bakar gas alam, sehingga harus diminimalisir kandungannya dalam gas alam. Salah satu proses pengambilan gas tersebut adalah dengan cara absorpsi reaktif menggunakan larutan MDEA dengan promotor Pipearazine (PZ), karena pelarut ini mempunyai sifat selektif terhadap penyerapan H<sub>2</sub>S dan CO<sub>2</sub>. Proses absorpsi gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S yang dilakukan dalam *tray column* merupakan pilihan

yang lebih baik dari pada *packed column* yaitu untuk menghindari masalah distribusi liquid di dalam kolom yang berdiameter besar dan untuk mengurangi ketidakpastian dalam pembesaran skala. Penelitian ini bertujuan untuk menggunakan model matematik dan mensimulasikan proses absorpsi  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$  dengan larutan MDEA dan promotor PZ menggunakan *tray column*. Pada kajian teoritis ini diperlukan data-data seperti konstanta kesetimbangan reaksi, laju reaksi, data kelarutan, koefisien perpindahan massa pada sisi gas dan liquid yang diperoleh dari literatur. Model matematik yang dikembangkan berdasarkan pada transfer massa pada teori film dengan asumsi reaksi pseudo first order. Penyelesaian numerik yang telah dilakukan menunjukkan bahwa dengan meningkatkan suhu 303 K hingga 333 K akan meningkatkan %removal sebesar 57,73% - 64,66%, namun jika dipanaskan lebih lanjut akan cenderung konstan. Untuk tekanan jika dinaikan 10 atm hingga 40 atm akan meningkatkan %removal dari 13,99% hingga 60,27% dan dengan menaikkan konsentrasi MDEA dari 20%wt hingga 50%wt akan menaikkan %removal 58,53 - 60,94%. Jumlah PZ yang ditambahkan mampu meningkatkan %removal secara signifikan hingga penggunaan 3%wt. Hasil tersebut telah divalidasi dengan perhitungan menggunakan Hysys yang

menghasilkan deviasi pada gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S sebesar 4,63% dan 5,34%.

Kata kunci : absorpsi, MDEA, PZ, *tray*, laju absorpsi, *percent removal*.

**MODELING AND SIMULATION CO<sub>2</sub> & H<sub>2</sub>S  
ABSORPTION IN MDEA SOLUTION WITH  
PROMOTER PIPERAZINE (PZ) USING THE TRAY  
COLUMN**

**Name** : 1. Naufal Hilmy Alhady  
2. Mochammad Yoga Arifin  
**NRP** : 1. 2314106022  
2. 2314106029  
**Advisor 1** : Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S.  
**Advisor 2** : Dr. Ir. Susianto, DEA.

***ABSTRACT***

H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub> removal in natural gas is the most important process in the natural gas plant. H<sub>2</sub>S is a corrosive gas when mixed with moisture and release CO<sub>2</sub> into the atmosphere will cause the greenhouse effect. CO<sub>2</sub> can reduce the heating value of natural gas, so it should be minimized its content in natural gas. One of the gas removal method is reactive absorption using MDEA solution with promotor Piperazine (PZ) , because it has the properties as selective solvent for absorption of H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub>. The process of absorption of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S gas is conducted in a tray column is a better choice than the packed column that is to avoid

distribution problems Liquid in large diameter columns and to reduce uncertainties in an enlarged scale. In this theoretical study required data such as the equilibrium constant of the reaction, the reaction rate, the data solubility, mass transfer coefficient on the gas side and the liquid obtained from the literature. Developed a mathematical model based on mass transfer in film theory assuming a pseudo first order reaction. Numerical solution that has been done shows that by increasing the suhu of 303 K to 333 K will increase removal% by 57.73% to 64.66%, when heated more will tend constant. For if the pressure is increased 10 atm to 40 atm % removal will increase from 13.99% to 60.27% and by raising the MDEA concentration of 20% wt to 50% wt %removal will increase from 58.53% to 60.94%. PZ added amount can improve significantly %removal up to use 3% wt. These results have been validated by using a calculation that generates Hysys deviation in CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S gas by 4.63% and 5.34%.

Keywords: absorption, MDEA, PZ, tray, absorption rate, percent removal



(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kami ucapkan kehadiran Allah Yang Maha Kuasa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga kami dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul:

**“SIMULASI DAN PEMODELAN ABSORPSI CO<sub>2</sub> DAN H<sub>2</sub>S DALAM LARUTAN MDEA DENGAN PROMOTOR PIPERAZINE (PZ) MENGGUNAKAN *TRAY COLUMN*”.**

Skripsi ini disusun untuk melengkapi persyaratan penelitian skripsi dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) pada bidang Studi S1 Teknik Kimia di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pada kesempatan ini dengan kerendahan hati kami menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua dan keluarga kami yang telah memberikan dukungan, baik doa maupun dukungan lainnya.
2. Bapak Juwari, S.T., M.Eng, Ph.D, selaku Ketua Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS Surabaya.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.S, selaku Dosen Pembimbing 1 dan Kepala Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa atas bimbingan dan saran yang telah diberikan.
4. Bapak Dr. Ir. Susianto, DEA. selaku Dosen Pembimbing 2 atas bimbingan dan saran yang telah diberikan.
5. Bapak Prof. Ir. Dr. Nonot Soewarno, M.Eng, Bapak Fadlilatul Taufany, S.T, Ph.D, Ibu Dr. Yeni Rahmawati, S.T., M.T, dan Siti Nurkhamidah, ST., MSc., Ph.D selaku Dosen Laboratorium Perpindahan

Panas dan Massa, atas bimbingan dan saran yang telah diberikan.

6. Bapak dan Ibu Dosen Pengajar atas segala ilmu yang diberikan serta seluruh karyawan Departemen Teknik Kimia FTI-ITS Surabaya.
7. Teman-teman LTD Crew di Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa atas doa, semangat, perhatian dan kasih sayang selama ini.
8. Teman-teman LJ angkatan 2014 genap yang telah memberikan dukungan dan bantuan sehingga kami dapat menyelesaikan skripsi ini.
9. Seluruh pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu, yang turut membantu kami.

Kami menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran dari pembaca sangat penulis harapkan sebagai upaya peningkatan kualitas dari penulisan skripsi ini.

Surabaya, Januari 2017

Penyusun

## DAFTAR ISI

### LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK .....	i
<i>ABSTRACT</i> .....	iv
KATA PENGANTAR .....	vii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL .....	xv
BAB I    PENDAHULUAN.....	1
1.1    Latar Belakang .....	1
1.2    Perumusan Masalah.....	6
1.3    Batasan Masalah.....	6
1.4    Tujuan Penelitian .....	7
1.5    Manfaat Penelitian.....	7
BAB II    TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1    Absorpsi Fisik.....	9
2.2    Teori Lapisan Film .....	10
2.3    Absorpsi Disertai Reaksi Kimia .....	13
2.4    Alkanolamina .....	20
2.5    Piperazine .....	23
2.6    Mekanisme Reaksi .....	24
2.7    Tipe Kolom .....	26
2.8    Penelitian yang Sudah Dilakukan.....	29

BAB III	METODE PENELITIAN .....	33
3.1	Sistem yang Ditinjau .....	35
3.2	Model Matematika .....	35
3.3	Data Perpindahan Massa .....	37
3.4	Data Kelarutan Komponen .....	38
3.5	Pengembangan Model Matematis Proses Absorpsi Pada Tray Column .....	40
3.6	Penyelesaian Numerik .....	42
3.7	Pembuatan Program .....	42
3.8	Validasi Data .....	42
3.9	Analisa Model Matematis .....	42
3.10	Variabel Penelitian .....	42
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN .....	45
4.1	Pengaruh Suhu (K) terhadap <i>percent removal</i> .....	46
4.2	Pengaruh Tekanan (atm) terhadap <i>percent removal</i> .....	49
4.3	Pengaruh Konsentrasi MDEA (% wt) terhadap <i>percent removal</i> .....	51
4.4	Pengaruh Konsentrasi Piperazine (% wt) terhadap <i>percent removal</i> .....	53
4.5	Distribusi Konsentrasi Komponen Dalam Gas .....	54

4.6	Distribusi Konsentrasi Komponen Dalam Liquid.....	55
4.7	Validasi Data Simulasi MATLAB dengan HYSYS .....	57
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN.....	59
5.1	Kesimpulan.....	59
5.2	Saran .....	60
DAFTAR PUSTAKA .....		xvii
DAFTAR NOTASI .....		xxi
LAMPIRAN A		
LAMPIRAN B		
LAMPIRAN C		

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Konsep teori 2 film Whitman untuk perpindahan massa fase gas - cair.....	12
Gambar 2.2	Tranfer Massa Gas ke Dalam Liquida Disertai Reaksi Kimia.....	15
Gambar 2.3	Perbandingan tipe <i>tray</i> .....	28
Gambar 3.1	Langkah-langkah pembuatan model matematik untuk proses absorpsi gas CO <sub>2</sub> dari gas alam ke dalam larutan promotor MDEA dengan aktivator PZ di dalam <i>tray column</i> .....	34
Gambar 3.2	Sistem Absorpsi Gas CO <sub>2</sub> dari Gas Alam ke dalam Larutan MDEA dengan Aktivator PZ di dalam <i>Tray Column</i> .....	35
Gambar 3.3	Skema untuk Tray Absorber .....	40
Gambar 4.1	Pengaruh suhu larutan MDEA terhadap persen removal CO <sub>2</sub> .....	46
Gambar 4.2	Pengaruh suhu larutan MDEA terhadap persen removal H <sub>2</sub> S .....	47
Gambar 4.3	Pengaruh tekanan larutan MDEA terhadap persen removal CO <sub>2</sub> .....	49
Gambar 4.4	Pengaruh tekanan larutan MDEA terhadap persen removal H <sub>2</sub> S .....	49



Gambar 4.5	Pengaruh konsentrasi MDEA (% wt) terhadap persen removal $\text{CO}_2$ .....	51
Gambar 4.6	Pengaruh konsentrasi MDEA (% wt) terhadap persen removal $\text{H}_2\text{S}$ .....	52
Gambar 4.7	Pengaruh konsentrasi Pz (% wt) terhadap persen removal $\text{CO}_2$ .....	53
Gambar 4.8	Distribusi konsentrasi komponen gas $\text{CO}_2$ dan $\text{H}_2\text{S}$ di dalam tray column .....	54
Gambar 4.9	Distribusi konsentrasi komponen liquid $\text{CO}_2$ dan $\text{H}_2\text{S}$ di dalam tray column .....	56

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan Karakteristik Pelarut Alkanolamina .....	21
Tabel 2.2	Penelitian yang Sudah Dilakukan .....	29
Tabel 3.1	Nilai konstanta Henry air murni pada $T=298\text{ K}$ tiap komponen .....	39
Tabel 3.2	Nilai $h_G$ dan $h_T$ tiap komponen .....	39
Tabel 4.1	Validasi hasil simulasi MATLAB dan HYSYS.....	57

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Dalam beberapa tahun terakhir, minat pada pengembangan teknologi penghilangan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan Hidrogen Sulfida ( $\text{H}_2\text{S}$ ) semakin meningkat karena dampaknya pada pemanasan global dan perubahan iklim, yang terutama disebabkan oleh emisi  $\text{CO}_2$ . Selain itu,  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$  biasanya banyak terdapat pada eksplorasi gas alam. Gas alam (NG) merupakan sumber daya alternatif yang memiliki kandungan  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$  yang tinggi yang membutuhkan proses pemisahan sebelum diolah lebih lanjut. Sebagai pengotor,  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$  bisa menjadi zat yang bersifat korosif dengan adanya air dan menyebabkan kerusakan di jaringan pipa gas.

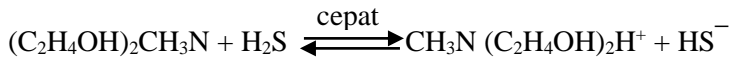
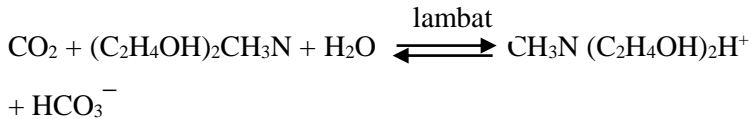
Kandungan  $\text{CO}_2$  yang tinggi dalam pipa dapat memberikan efek negatif, antara lain menurunkan nilai bakar (*heating value*) gas alam, menyebabkan korosi pada peralatan proses dan berpotensi terjadinya pembekuan (*freezing*) dalam pipa. *Freezing* berkaitan dengan suhu gas alam yang dipasarkan pada suhu sangat rendah yaitu  $-161^\circ\text{C}$  dalam bentuk LNG dimana pada suhu tersebut,  $\text{CO}_2$  akan berada dalam keadaan beku. Sedangkan  $\text{H}_2\text{S}$  merupakan gas beracun

yang sangat korosif terhadap peralatan diproses kilang. Berdasarkan informasi tentang pengaruh negatif tersebut, dapat disimpulkan bahwa proses penyisihan  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$  merupakan tahapan penting dalam pengolahan gas alam keseluruhan.

Terdapat banyak proses penyisihan  $\text{H}_2\text{S}$  dan  $\text{CO}_2$ , diantaranya adalah adsorpsi, absorpsi, *cryogenic* dan teknologi membran. Diantara metode tersebut pemisahan dengan metode absorpsi baik dengan larutan alkali (larutan amina) atau pelarut fisik (larutan glikol) adalah metode yang paling banyak digunakan dan paling efektif, namun absorpsi dengan pelarut fisik tidak ekonomis (Kohl,1997).

Absorben adalah cairan yang dapat melarutkan bahan yang akan diabsorpsi pada permukaannya. Absorben berbasis amina, seperti monoethanolamine (MEA), diethanolamine (DEA), N-metildietanolamina (MDEA) dan di-2-propanolamine (DIPA) adalah absorben yang paling banyak digunakan karena reaktivitas tinggi dengan  $\text{CO}_2$  serta reaksi berlangsung secara *reversible* sehingga proses *removal* menjadi lebih mudah. Dari beberapa larutan amina yang ada, MDEA dipilih karena mempunyai beberapa keuntungan yaitu, tekanan uap rendah, dapat digunakan hingga konsentrasi 60% berat tanpa adanya komponen yang hilang akibat adanya penguapan, stabil pada suhu tinggi, sedikit korosif, panas

reaksi rendah, dan selektivitas terhadap H<sub>2</sub>S tinggi, dimana reaksi antara MDEA dengan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S adalah sebagai berikut :



Larutan MDEA kemudian dicampurkan dengan aktivator spesifik piperazine (PZ) yang berfungsi meningkatkan proses penyerapan. Penggunaan PZ yang ditambahkan pada pelarut berfungsi untuk mengaktifkan pelarut MDEA. PZ adalah pelarut yang stabil dengan kapasitasnya sebagai penangkap CO<sub>2</sub>, memiliki tingkat penyerapan CO<sub>2</sub> yang tinggi, tidak mudah terdegradasi dan oksidatif (Mazari, 2016).

Absorber yang akan digunakan pada penelitian ini yaitu jenis absorber *tray* atau *plate tower*. *Tray column* adalah kolom pemisah berupa silinder tegak, dimana bagian dalam dari kolom berisi sejumlah *tray* atau *plate* yang disusun pada jarak tertentu (*tray/plate spacing*) di sepanjang kolom. Cairan dimasukkan dari puncak kolom dan dalam perjalanannya cairan akan mengalir dari *tray* yang satu ke *tray* yang lain yang ada di bawahnya. Selama proses berlangsung, di setiap

*tray* akan terjadi kontak antara fase cair dengan fase uap yang dimasukkan dari dasar kolom.

Dalam beberapa tahun terakhir telah dilakukan penelitian mengenai optimasi penyisihan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S dengan larutan MDEA. Menurut Van Loo dkk., (2007) dengan menambahkan promotor MEA sebesar 2,5% mol ke dalam larutan MDEA mampu mengurangi kebutuhan jumlah *tray* dari 40 ke 25. Namun kelemahannya adalah promotor MEA hanya meningkatkan nilai *enhancement factor* pada bagian atas kolom saja. Penelitian lebih lanjut mengenai proses penyisihan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S juga telah dilakukan oleh Rozi M. (2009) dengan umpan gas alam yang telah divalidasikan pada industri migas dengan jenis *valve tray* dan diameter *tray* 2,2 m serta jumlah *tray* sebanyak 12 dimana penelitian ini menggunakan pelarut MDEA tanpa menggunakan tambahan aktivator PZ.

Model yang digunakan adalah model film dengan pendekatan *enhancement factor* dalam kondisi isothermal. Dimana hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu semakin besar nilai % *removal* gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S, demikian juga dengan konsentrasi dan tekanan dimana kenaikannya diiringi dengan bertambahnya nilai % *removal* gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S sehingga didapatkan kondisi optimum operasi yaitu tekanan 30 atm, suhu larutan MDEA 40°C dan

konsentrasi MDEA 0,0043 g/mol/cm<sup>3</sup>. Dimana % *removal* yang didapatkan pada penelitian menunjukkan penyimpangan 14,7% untuk gas CO<sub>2</sub> sedangkan untuk gas H<sub>2</sub>S sebesar 0,16%. Kemudian, Baniadam dkk., (2009) menunjukkan bahwa model matematis dengan *two-film theory* akan memberikan fenomena distribusi suhu serta nilai *enhancement factor* pada tiap *tray*. Sedangkan menurut Ibrahim dkk., (2014), menjelaskan bahwa penggunaan promotor piperazine di dalam penyisihan CO<sub>2</sub> pada gas alam sebanyak 3% menurunkan jumlah CO<sub>2</sub> yang terkandung di dalam umpan hingga kurang dari 1% yang mana keadaan tersebut tidak dapat dicapai oleh larutan MDEA saja tanpa adanya penambahan promotor PZ, selain itu kenaikan suhu sebesar 10°C akan meningkatkan penyerapan CO<sub>2</sub> sebesar 0,5% secara bertahap dengan menambahkan konsentrasi dari PZ dalam konsentrasi rendah. Sedangkan tekanan di dalam kolom akan memberikan efisiensi tertinggi pada tekanan sekitar 20 bar.

Borhani dkk., (2015) dalam studinya menjelaskan mengenai penggunaan *rate-based model* di dalam absorpsi reaktif antara CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S dengan larutan MDEA di dalam *packed column* eksperimen tersebut hasil yang didapatkan adalah model absorber menunjukkan bahwa seiring bertambahnya konsentrasi *acid gases* di dalam umpan maka akan diiringi dengan penurunan area spesifik permukaan



*packing* dan koefisien neraca massa *overall* bertambah seiring dengan penambahan umpan absorben di dalam *packed column*. Dengan mempertimbangkan penelitian-penelitian tersebut, perlu dilakukannya penelitian absorpsi gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S dengan larutan MDEA dan katalis PZ di dalam kolom *sieve tray* untuk membuat simulasi absorpsi dan hasilnya akan dibandingkan dengan Hysys.

### **1.2. Perumusan Masalah**

Menggunakan model *two-film theory* dengan pendekatan *enhancement factor* di dalam absorpsi reaktif CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S dengan larutan MDEA berpromotor PZ menggunakan *tray column* dan mempelajari distribusi pengaruh variabel-variabel proses terhadap % CO<sub>2</sub> dan % H<sub>2</sub>S removal.

### **1.3. Batasan Masalah**

Untuk membatasi masalah yang akan dibahas maka digunakan asumsi-asumsi :

1. Absorpsi CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S terjadi pada kondisi *steady state*.
2. Fase liquid mengandung komponen *non-volatile* sehingga tidak ada material atau energi yang hilang karena evaporasi.
3. Pola aliran liquid adalah *Crossflow*.
4. Reaksi pada fase liquid seluruhnya terjadi dalam film.

5. Properti-properti fisik dari fase gas bergantung pada suhu dan mengasumsikan gas ideal.
6. Reaksi berlangsung dengan kondisi *isothermal*.

#### **1.4. Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menggunakan model matematika di dalam proses absorpsi gas  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$  dengan larutan MDEA berpromotor PZ menggunakan *tray column*.
2. Melakukan validasi model matematika dengan membandingkan hasil prediksi dengan hysys.
3. Mengkaji secara teoritis pengaruh distribusi berbagai variabel proses seperti suhu, tekanan, konsentrasi larutan MDEA, dan konsentrasi promotor terhadap efisiensi absorpsi.

#### **1.5. Manfaat Penelitian**

Dari hasil penelitian diharapkan dapat dijadikan acuan pada industri untuk merancang unit pemisahan  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$  dalam menganalisa dan mengoptimasi kinerja unit tersebut.

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

Absorpsi adalah proses pemisahan bahan dari suatu campuran gas dengan cara pengikatan bahan tersebut pada permukaan absorben cair yang diikuti dengan pelarutan. Kelarutan gas yang akan diserap dapat disebabkan hanya oleh gaya-gaya fisik (pada absorpsi fisik) atau selain gaya tersebut juga oleh ikatan kimia (pada absorpsi kimia). Komponen gas yang dapat mengadakan ikatan kimia akan dilarutkan lebih dahulu dan juga dengan kecepatan yang lebih tinggi. Secara umum, absorpsi reaktif dikenal sebagai penyerapan gas dalam medium cair dengan reaksi kimia. Proses tersebut memiliki beberapa keuntungan dimana dalam proses tersebut dapat meningkatkan *yield* reaksi dan *selectivity*, mengatasi hambatan termodinamika seperti reduksi dalam konsumsi energi, air dan pelarut. Oleh karena adanya interaksi antara reaksi kimia dan perpindahan massa dan panas yang cukup kompleks (Gorak & Kenig, 2005).

#### **2.1. Absorpsi Fisik**

Absorpsi merupakan suatu teknik pemurnian gas paling penting. Teknik ini menyangkut perpindahan massa suatu material dari fase gas ke fase cair melalui batas fase. Material

yang diserap dapat larut secara fisik dalam cairan, maka disebut absorpsi fisik, atau bereaksi secara kimia dengan cairan disebut absorpsi kimia. Absorpsi fisik adalah absorpsi dimana gas terlarut dalam cairan tanpa disertai reaksi kimia, misalnya absorpsi CO<sub>2</sub> atau H<sub>2</sub>S dengan menggunakan pelarut-pelarut air, *n-methyl-2-pyrrolidone*, *methanol*, dan *propylene carbonate* (Kohl & Nielsen, 1997).

Ada beberapa teori yang digunakan untuk menggambarkan fenomena perpindahan massa yang terjadi pada absorpsi fisik. (Astarita, 1967), yakni:

1. Teori 2 film
2. Teori penetrasi
3. Teori pembaruan permukaan

## **2.2. Teori Lapisan Film (*Film Model*)**

Teori dua film diajukan oleh Whitman pada tahun 1923 dan pada tahun 1928 Hatta menggunakan model ini untuk memodelkan absorpsi disertai reaksi kimia. Pada teori ini dianggap ada suatu lapisan stagnan dalam kedua fase sepanjang *interface*. Di dalam fase gas perpindahan massa komponen A kedalam *interface* mengalami tahanan dalam film gas dan tahanan perpindahan massa komponen A dari *interface* ke badan cairan film cair (Treybal, 1980). Bila diterapkan pada suatu proses absorpsi yang dikendalikan oleh

sisi cair, model teori film mengevaluasi laju absorpsi per satu satuan luas permukaan R:

$$R = -D_A \left( \frac{\partial C_A}{\partial x} \right)_{x=0} \quad (2.1)$$

Secara skematis model film Whitman diberikan pada gambar 2.1. Gradien konsentrasi A antara  $x = 0$  sampai  $x = \delta$  adalah konstan dalam film stagnan bila tidak terjadi generasi atau reaksi kimia. Gradien konsentrasi untuk model Whiteman diberikan pada persamaan berikut:

$$\left( \frac{\partial C_A}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{C_{Ai} - C_{A0}}{\delta} \quad (2.2)$$

Koefisien perpindahan massa untuk sisi cair  $k_L$ , untuk absorpsi fisik diberikan oleh persamaan berikut:

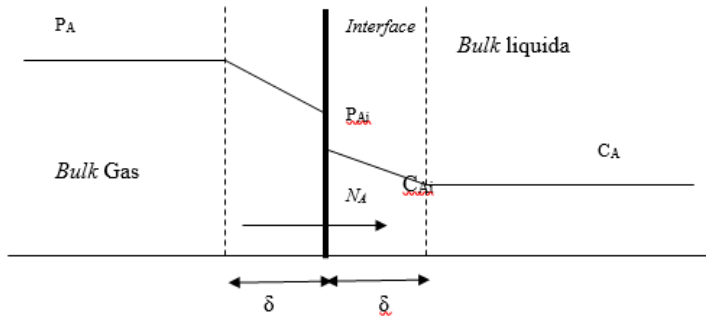
$$k_L = \frac{R}{C_{Ai} - C_{A0}} \quad (2.3)$$

Sehingga apabila disubstitusikan antara persamaan (2.3) ke persamaan (2.2) maka didapatkan persamaan berikut:

$$-\left( \frac{\partial C_A}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{R}{k_L \delta} \quad (2.4)$$

Apabila persamaan (2.4) disubstitusikan ke persamaan (2.1) maka didapatkan persamaan berikut:

$$k_L = \frac{D_A}{\delta} \quad (2.5)$$



**Gambar 2.1** Konsep teori 2 film Whitman untuk perpindahan massa fase gas-cair.

Teori dua film merupakan teori untuk keadaan *steady state*. Diasumsikan bahwa gas dan cairan berada pada kesetimbangan pada *interface* dan bahwa film-film tipis memisahkan *interface* dari bagian kedua fase. Karena kuantitas material yang dipindahkan dari *interface* ke cairan maka dapat diambil hubungan seperti persamaan berikut ini.

$$N_A = k_G (p_A - p_{Ai}) = k_L (C_A - C_{Ai}) \quad (2.6)$$

Absorben yang sekarang sering digunakan sebagai *chemical solvent* adalah larutan alkanoamine. Alkaloamine yang tersedia secara komersial untuk proses absorpsi diantaranya monoethanolamine (MEA), diethanolamine (DEA), diisopropanolamine (DIPA), N-methyldiethanolamine (MDEA), dan 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP). Selain itu, ada pula upaya pemanfaatan piperazine (PZ) untuk aktivasi larutan MDEA untuk proses absorpsi  $\text{CO}_2$ .

Untuk mendesain atau mensimulasikan absorpsi yang melibatkan reaksi dibutuhkan beberapa data penting, diantaranya adalah:

1. Properti fisik (*thermal* dan transport dari cair dan gas yang terlibat dalam sistem)
2. Data kesetimbangan uap-cair (konfigurasi internal dari column yang digunakan)
3. Data laju reaksi kimia

### **2.3. Absorpsi Disertai Reaksi Kimia**

Absorpsi kimia adalah absorpsi dimana gas terlarut dalam cairan penyerap disertai reaksi kimia. Misalnya absorpsi  $\text{CO}_2$  di dalam larutan  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , *Diethylethanolamine* (DEA) dan *Methyldiethanolamine* (MDEA). Dalam absorpsi dengan reaksi kimia suatu molekul A (*solute*), diabsorb ke dalam suatu cairan B (reaktan), dimana komponen A bereaksi dengan komponen B. Reaksi tersebut bisa berlangsung dalam regim cepat, lambat, *reversible*, *irreversible*, dan dalam berbagai orde reaksi. Proses keseluruhan dapat diperkirakan menjadi 4 tahap (Astarita, 1967), yaitu:

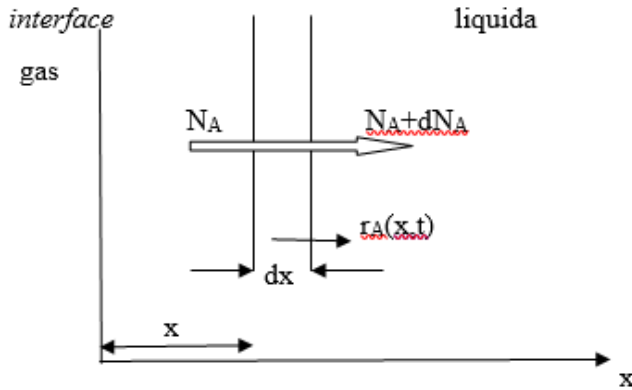
1. Difusi A ke fase gas menuju *interface* gas-cair
2. Difusi A dari *interface* ke dalam cairan, dan difusi B dari cairan menuju *interface* serta terjadi reaksi antara A dan B



3. Difusi produk dari reaksi dalam fas cair, produk volatil akan mendifusi ke *interface*
4. Difusi produk gas menuju fase gas

Adanya reaksi kimia dapat mengubah profil konsentrasi A, gradien konsentrasinya akan naik sehingga mempercepat laju absorbsinya dibandingkan dengan absorpsi fisik. Oleh karena itu, untuk memperhitungkan pengaruh reaksi kimia terhadap konsentrasi komponen yang mendifusi daerah dekat *interface*, maka dalam persamaan difusi *unsteady* harus ditambahkan persamaan laju reaksi kimia. Laju absorpsi diturunkan menurut model perpindahan massa yang dijelaskan sebelumnya. Teori film merupakan model-model yang sifatnya sangat teoritis. Model ini sifatnya praktis, meskipun mempunyai ruang lingkup penerapan yang terbatas, tetapi model ini lebih mudah digunakan dan memerlukan waktu perhitungan yang relatif singkat.

Pada kasus absorpsi gas A kedalam liquid, ada kemungkinan gas terlarut A bereaksi dengan pelarut/reaktan lain dalam liquid dengan laju reaksi  $r_A$ . Perhatikan Gambar 2.2 neraca massa A elemen volume  $dv$  atau  $(A dx)$ .



**Gambar 2.2** Transfer Massa Gas ke Dalam Liquid Disertai Reaksi Kimia

*rate in = rate out + accumulation + reaction rate*

$$N_A A = (N_A + dN_A) A + \frac{\partial c_A}{\partial t} (A dx) + r_A (A dx) \quad (2.7)$$

$$N_A A - N_A A - dN_A A = \frac{\partial c_A}{\partial t} (A + dx) + r_A (A dx) \quad (2.8)$$

$$N_A = -D_A \frac{\partial c_A}{\partial x} \text{ fluks difusi A dalam liquid (Fick's first law)}$$

Bila Persamaan (2.7) dibagi dengan  $A \cdot dx$ , dan disubstitusi harga  $N_A$  diperoleh:

$$-\frac{d}{dx} \left( -D_A \frac{dC_A}{dx} \right) = \frac{\partial c_A}{\partial t} + r_A \quad (2.9)$$

$$D_A \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} = \frac{\partial C_A}{\partial t} + r_A \quad (2.10)$$

### 2.3.1. Pengaruh Reaksi Kimia pada Laju Perpindahan Massa

Dalam sistem multifase reaksi kimia mempengaruhi laju perpindahan massa dalam dua cara yang berbeda:

1. Pada laju reaksi rendah, merubah konsentrasi perpindahan *bulk* yang terlarut, sehingga menaikkan *driving force*.
2. Sebaliknya reaksi cepat, gradien konsentrasi dekat *interface* mempengaruhi *enhancement* laju perpindahan massa.

### 2.3.2. *Enhancement Factor*

Dalam absorpsi gas dimana perpindahan massa gas-liquid yang disertai dengan reaksi kimia dalam fase liquid laju absorpsi gas bisa dinaikkan secara signifikan. Secara umum untuk menjelaskan pengaruh konsep *enhancement factor* ini diterapkan, dimana *enhancement factor*  $E$  didefinisikan sebagai perbandingan laju spesifik absorpsi gas dalam liquid reaktif dengan laju spesifik absorpsi pada kondisi identik dalam liquid non reaktif (perpindahan massa fisika). Beberapa model teoritis telah dikembangkan untuk menghitung pengaruh ini, karena pentingnya *enhancement factor* untuk tujuan perancangan. Model yang paling banyak dipergunakan

adalah *film model*, Higbie *penetration model* dan Danckwerts *surface renewal model*.

*Enhancement factor* E dapat diperkirakan secara numerik dengan menggunakan Persamaan (2.14) dan menggunakan model transfer massa *interface* tertentu. Pada reaksi order dua searah persamaan dapat diselesaikan menurut film model.

$$D_A \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} - k_2 C_A C_B = 0 \quad (2.11)$$

$$D_B \frac{\partial^2 C_B}{\partial x^2} - k_2 C_A C_B = 0 \quad (2.12)$$

Dengan kondisi batas:

$$\begin{aligned} C_A &= C_{Ai} & x &= 0 \\ C_A &= C_{A0} & x &= \delta \\ C_B &= C_{B0} & x &= \delta \\ \frac{dC_B}{dx} &= 0 & x &= 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

Van Krevelen dan Hoftijer (1948) telah menyelesaikan persamaan diatas menggunakan metode pendekatan dan hasil dapat direpresentasikan dalam pers (2.14):

$$E = \frac{\sqrt{M \frac{Ei - E}{Ei - 1}}}{\tanh \sqrt{M \frac{Ei - E}{Ei - 1}}} \quad (2.14)$$

Dimana M adalah bilangan Hatta dan Ei adalah *enhancement factor* yang berhubungan dengan reaksi yang berjalan secara instan seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (2.15) dan (2.16)

$$\sqrt{M} = \frac{\sqrt{D_A k_2 C_{B0}}}{k_1} \quad (2.15)$$

$$Ei = 1 + \frac{D_B C_{B0}}{z D_A C_{Ai}} \quad (2.16)$$

### 2.3.3. Regim Reaksi

Dalam fenomena absorpsi reaktif ada dua proses kompetitif yang harus diperhatikan yaitu reaksi dan difusi. Laju relatif proses ini digambarkan sebagai waktu reaksi dan difusi.

Waktu reaksi  $t_R$  adalah ukuran waktu yang dibutuhkan reaksi kimia untuk merubah sejumlah konsentrasi reaktan yang terbatas.

Waktu difusi  $t_D$  adalah ukuran waktu yang tersedia fenomena difusi molekuler terjadi sebelum bercampur dalam fase liquid menjadi konsentrasi yang sama.

Rasio tak berdimensi  $\Phi = \frac{t_D}{t_R}$  dipergunakan untuk menghitung laju reaksi dan difusi relatif.

Ada tiga regim reaksi yang didefinisikan sebagai laju relatif reaksi dan difusi:

1.  $\Phi \ll 1$  dan  $\sqrt{M} < 0.02$  reaksi ini sangat lambat untuk mendapatkan pengaruh yang signifikan pada fenomena difusi dan tidak terjadi *rate enhancement*. *Enhancement factor* itu E. Kondisi ini sebagai “*Slow Reaction Regime*” dalam regim reaksi kimia yang hanya menjaga konsentrasi *solute* rendah .
2.  $\Phi \rightarrow \infty$  dan  $0.02 < \sqrt{M} < 2$ , batas reaksi cepat tertentu “*Instantaneous Reaction Regim*” tercapai bila semua tahanan transfer massa yang disebabkan kinetika kimia telah dihilangkan, pada titik  $\Phi \rightarrow \infty$  dan *enhancement factor* untuk reaksi instan E akan sangat besar. Harga E yang dihitung adalah  $10^2$  sampai  $10^3$ .
3.  $\Phi \gg 1$  dan  $\sqrt{M} > 2$ , reaksi ini cukup cepat untuk menghasilkan *rate enhancement* yang signifikan “*Fast Reaction Regime*”.

## 2.4. Alkanolamina

Alkanolamina dapat diklasifikasikan menjadi tiga berdasarkan struktur kimianya, yaitu *primary amine*, *secondary amine* dan *tertiary amine*. *Primary amine* memiliki satu rantai alkanol dan dua atom hidrogen yang terikat atom nitrogen, contohnya adalah *methylethanolamine* (MEA). *Secondary amine* memiliki dua rantai atom alkanol dan satu atom hidrogen yang terikat atom nitrogen, contohnya adalah *diethanolamine* (DEA) dan *diisopropylamine* (DIPA). *Tertiary amine* tidak memiliki atom hidrogen, secara langsung terikat atom nitrogen, contohnya adalah *methyldiethanolamine* (MDEA) (Cullinane, 2005; Wang, 2011).

Maddox dkk., (1998) melaporkan bahwa masing-masing alkanolamina memiliki setidaknya satu gugus hidroksil dan satu gugus amino. Gugus hidroksil mengurangi tekanan uap dan meningkatkan kelarutan di dalam air dimana gugus amino meningkatkan alkalinitas dalam larutan air untuk bereaksi dengan gas asam. Amina primer dan sekunder memiliki ikatan atom nitrogen dengan atom hidrogen yang masih dapat disubsitusi oleh gugus hidroksil, sedangkan atom nitrogen pada amina tersier tidak berikatan dengan atom hidrogen.

Perbandingan karakteristik pelarut alkanolamina dapat dilihat pada tabel 2.1 di bawah ini

**Tabel 2.1** Perbandingan Karakteristik Pelarut Alkanolamina

<b>Pelarut</b>	<b>Kelebihan</b>	<b>Kekurangan</b>
<i>Monoethanole Amine</i> (MEA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sangat reaktif terhadap CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S.</li> <li>• Mampu menghilangkan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S secara bersamaan.</li> <li>• <i>Recovery</i> CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S tinggi.</li> <li>• Harganya paling murah dibanding pelarut amina lainnya.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alat rentan mengalami korosi, terutama jika konsentrasinya di atas 20% wt.</li> <li>• Mengalami reaksi <i>irreversible</i> dengan COS dan CS<sub>2</sub> sehingga tidak cocok digunakan untuk gas yang mengandung kedua senyawa tersebut.</li> <li>• Tekanan uapnya tinggi sehingga banyak massa</li> </ul>



Pelarut	Kelebihan	Kekurangan
		<p>yang hilang saat diregenerasi.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Energi yang dibutuhkan untuk regenerasi cukup tinggi.</li> </ul>
<i>Diethanole Amine</i> (DEA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tekanan uapnya lebih rendah dibanding MEA sehingga mengurangi kehilangan massa saat regenerasi.</li> <li>Dapat digunakan untuk absorpsi gas yang mengandung COS dan CS<sub>2</sub>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dapat bereaksi dengan CO<sub>2</sub> secara <i>irreversible</i> sehingga pelarut ini tak optimal jika digunakan untuk absorpsi gas dengan kandungan CO<sub>2</sub> yang tinggi.</li> </ul>
<i>Methyl Diethanole Amine</i> (MDEA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tekanan uapnya sangat rendah sehingga dapat digunakan hingga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Akibat selektifannya yang tinggi terhadap H<sub>2</sub>S,</li> </ul>

Pelarut	Kelebihan	Kekurangan
	konsentrasi 60% wt. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sangat selektif terhadap H<sub>2</sub>S.</li> <li>• Tidak korosif.</li> <li>• Banyak digunakan untuk absorpsi dengan kandungan CO<sub>2</sub> yang tinggi.</li> <li>• Energi untuk regenerasi rendah.</li> </ul>	maka akan terjadi CO <sub>2</sub> <i>slippage</i> sehingga absorpsi CO <sub>2</sub> kurang maksimal. Oleh karena itu pelarut ini biasanya digunakan untuk absorpsi gas CO <sub>2</sub> tanpa adanya H <sub>2</sub> S. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Harganya paling mahal di antara pelarut amina lainnya.</li> </ul>

(Sumber: Kohl & Nielsen, 1997; Kidnay, 2006)

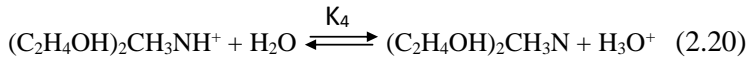
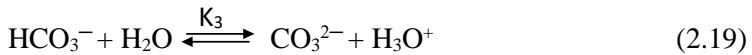
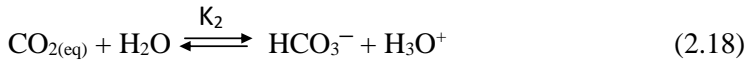
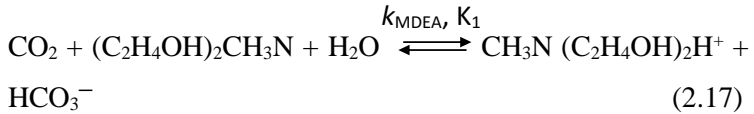
## 2.5. Piperazine (PZ)

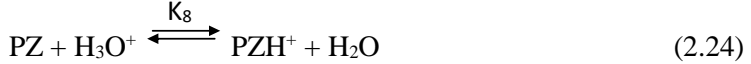
Piperazine (PZ) secara bebas larut dalam air dan etilena glikol, tetapi tidak larut dalam dietil eter dan merupakan basa lemah. Piperazine mudah menyerap air dan karbon dioksida dari udara. Meskipun banyak turunan piperazine terbentuk secara alami, piperazine sendiri dapat disintesis dengan

mereaksikan amonia beralkohol dengan 1,2-dikloroetana, oleh aksi natrium dan etilena glikol pada etilen diamin hidroklorida, atau dengan pengurangan pyrazine dengan natrium dalam etanol. Piperazine pada umumnya tersedia industri adalah sebagai hexahydrate ( $C_4H_{10}N_2 \cdot 6H_2O$ ) yang meleleh pada  $44^\circ C$  dan mendidih pada  $125-130^\circ C$ .

## 2.6. Mekanisme Reaksi

Mekanisme reaksi dari absorpsi  $CO_2$  dengan menggunakan promotor PZ terjadi di badan liquid dengan reaksi reversibel seperti dibawah ini (*Bishnoi and Rochelle, 2000*):





Untuk sistem  $\text{CO}_2$ -(MDEA-PZ- $\text{H}_2\text{O}$ ) nilai  $k_{\text{MDEA}}$  dapat diestimasi dengan persamaan Arrhenius, sehingga didapatkan korelasi sebagai berikut. Korelasi ini sesuai hasil eksperimen yang dikerjakan oleh Bishnoi dan Rochelle (2002).

$$k_{\text{MDEA}} = 5,86 \times 10^6 \times \exp\left(-\frac{3984}{TF}\right) \quad (2.26)$$

Dalam larutan MDEA yang telah diaktivasi, model dari laju absorpsi bisa digambarkan sebagai dua paralel *rapid pseudo-first-order reversible reaction* dan laju penyerapan keseluruhan dari karbon dioksida adalah :

Sedangkan nilai plot Arrhenius untuk  $k_p$  diberikan pada persamaan berikut :

$$k_{\text{PZ}} = 2,81 \times 10^{10} e^{(-5800/T)} \quad (2.27)$$

Sedangkan untuk reaksi antara  $\text{H}_2\text{S}$  yang terabsorb oleh MDEA akan terjadi reaksi kesetimbangan sebagai berikut:



Karena reaksi antara  $\text{H}_2\text{S}$  dan MDEA adalah reaksi cepat, maka koefisien kecepatan reaksi diasumsikan sebagai berikut dan laju penyerapan dari  $\text{H}_2\text{S}$  adalah:

$$k_{\text{H}_2\text{S}} = 10 \times k_{\text{MDEA}} \quad (2.29)$$

Sedangkan data kesetimbangan reaksi yang digunakan yaitu:

$$K_1 = K_2/K_4 \quad (2.30)$$

$$\ln (K_2) = (-12091,1/T) - 36.7816 \times \ln(T) + 235,482 \quad (2.31)$$

$$\ln (K_3) = (-12431,7/T) - 35.4819 \times \ln(T) + 220,067 \quad (2.32)$$

$$\ln (K_4) = (-423,98/T) - 9,4165 \quad (2.33)$$

$$\ln (K_5) = (-13445,9/T) - 22,4773 \times \ln(T) + 140,932 \quad (2.34)$$

## 2.7. Tipe Kolom

Absorpsi termasuk proses pemisahan berdasarkan proses difusi. Kecepatan perpindahan massa tergantung pada luas permukaan bidang batas antara fase uap dan fase cair yang saling mengadakan kontak. Saat merancang alat kontak diusahakan mendapatkan luas bidang kontak yang besar sehingga meningkatkan efisiensi pemisahan. Secara umum alat kontak bisa diklasifikasikan sebagai *tray/plate* dan *packing*.

*Tray* atau *plate tower* adalah kolom pemisah berupa silinder tegak dimana bagian dalam dari kolom berisi sejumlah *tray* atau *plate* yang disusun pada jarak tertentu (*tray/plate spacing*) di sepanjang kolom. Cairan dimasukkan dari puncak kolom dan dalam perjalanannya cairan akan mengalir dari *tray* yang satu ke *tray* yang lain yang ada di bawahnya. Selama proses berlangsung, di setiap *tray* akan terjadi kontak fase antara fase cairan dengan fase uap yang dimasukkan dari dasar kolom. Secara keseluruhan kontak antara fase dalam *tray*

*tower* dapat dipandang sebagai aliran lawan arah (*counter current*), meskipun arus yang sebenarnya terjadi arus silang (*crossflow*). Komponen pada *tray column*:

1. *Downcomer*: lubang tempat masuknya aliran dari atas berupa liquid (*plate* atas) ke *plate* bawah (*plate* bawah ini sebagai acuan).
2. *Downflow* : lubang tempat keluaran liquid dari *plate* atas (kita memandang sebagai acuan) ke *plate* di bawahnya.
4. *Slot* : tempat bukaan pada *cap* yang mempunyai macam-macam bentuk (trapesium, persegi, segitiga) yang berfungsi mengatur bukaan gas yang keluar ke atas sehingga liquid dan gas berkontak secara normal.
5. *Baffle* : penghalang yang berada di tengah-tengah *tray* untuk membuat aliran lebih lama berada di *tray* (penerapan hanya di *reverse flow*).
6. *Weir* : penghalang yang dipasang di pinggir dari *downflow*, tujuannya untuk membuat volume liquid yang tertampung di *tray* banyak, sehingga efektif terjadinya kontak antara liquid dan gas.

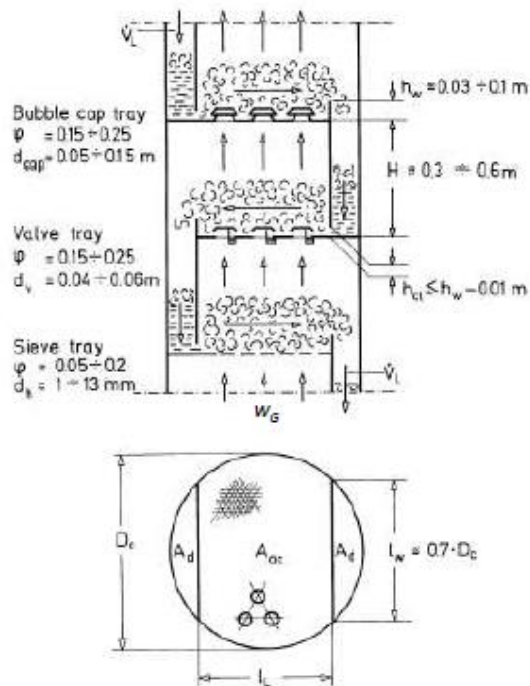
*Tray* atau *plate* adalah alat kontak antar fase yang berfungsi sebagai:

1. Tempat berlangsungnya proses perpindahan
2. Tempat terbentuknya keseimbangan
3. Alat pemisah dua fase seimbang

Tipe tray atau *plate*:

1. *Bubble Cap Tray*
2. *Sieve Tray* atau *Perforated Tray*
3. Valve Tray

*Characteristic dimensions  
of industrial tray designs*



**Gambar 2.3** Perbandingan Tipe *Tray*

## 2.8. Penelitian yang Sudah Dilakukan

Pemodelan dan simulasi ini merupakan lanjutan dari pemodelan dan simulasi sebelumnya. Pemodelan dan simulasi mengenai absorpsi  $\text{CO}_2$  terdahulu menggunakan *packed column*, sedangkan untuk *tray column* masih belum dilakukan penelitian. Penelitian yang sudah dilakukan ditunjukkan melalui tabel 2.2 berikut:

**Tabel 2.2** Penelitian yang Sudah Dilakukan

Penulis (tahun)	Judul	Hasil
Bishnoi, S., and Rochelle, G. T. (2000)	<i>Carbon Dioxide Absorption and Solution Equilibrium in Piperazine Activated Methyldiethanolamine</i>	<i>Modeling heat transfer model, energy balance dan mass balance untuk absorpsi <math>\text{CO}_2</math> pada <math>\text{K}_2\text{CO}_3</math> berpromotor DEA</i>
Al-Baghli, dkk., (2001)	<i>A rate-based model for the design of gas absorbers for the removal of <math>\text{CO}_2</math> and <math>\text{H}_2\text{S}</math> using aqueous solutions of MEA and DEA</i>	Mengajukan <i>rate-based model</i> untuk merancang alat absorber gas $\text{CO}_2$ dan $\text{H}_2\text{S}$ menggunakan larutan MEA dan DEA



<b>Penulis (tahun)</b>	<b>Judul</b>	<b>Hasil</b>
Van Loo dkk., (2007)	<i>The removal of carbon dioxide with activated solutions of methyl-diethanol-amine</i>	Dengan menambahkan promotor MEA sebesar 2,5%mol ke dalam larutan MDEA akan menurunkan jumlah tray dari 40 ke 25
Rozi dkk ., (2009)	Simulasi absorpsi CO <sub>2</sub> dan H <sub>2</sub> S dengan larutan MDEA dalam kolom <i>valve-tray</i>	Dengan validasi pada industri migas didapatkan penyimpanan persen recovery CO <sub>2</sub> dan H <sub>2</sub> S masing-masing yaitu 14,7% dan 0,16%
Ibrahim dkk.,(2014)	<i>Effect of piperazine on carbon dioxide removal from natural gas using aqueous methyl diethanol amine</i>	Penggunaan piperazine sebesar 3% sebagai aktivator akan menurunkan jumlah CO <sub>2</sub> yang terkandung didalam umpan hingga kurang dari 1%
Borhani	<i>Modeling study on</i>	Penggunaan <i>rate-based</i>

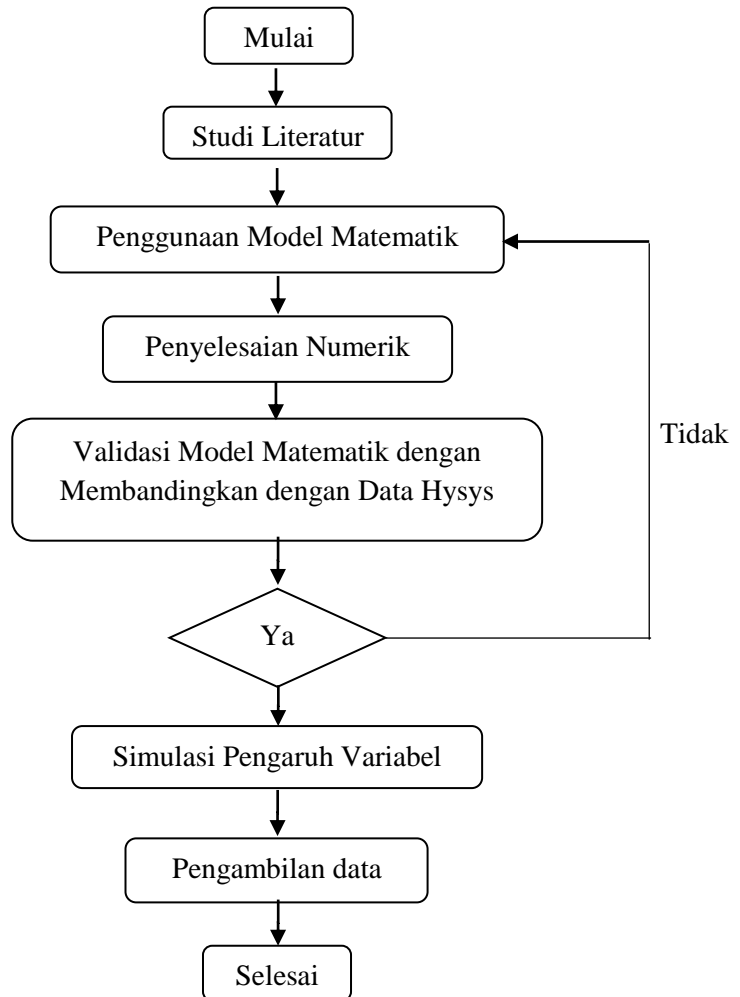
Penulis (tahun)	Judul	Hasil
dkk., (2016)	<i>CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S simultaneous removal using MDEA solution</i>	<i>model</i> di dalam absorpsi reaktif antara CO <sub>2</sub> dan H <sub>2</sub> S dengan larutan MDEA di dalam <i>packed</i> .

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

### **BAB III**

#### **METODOLOGI PENELITIAN**

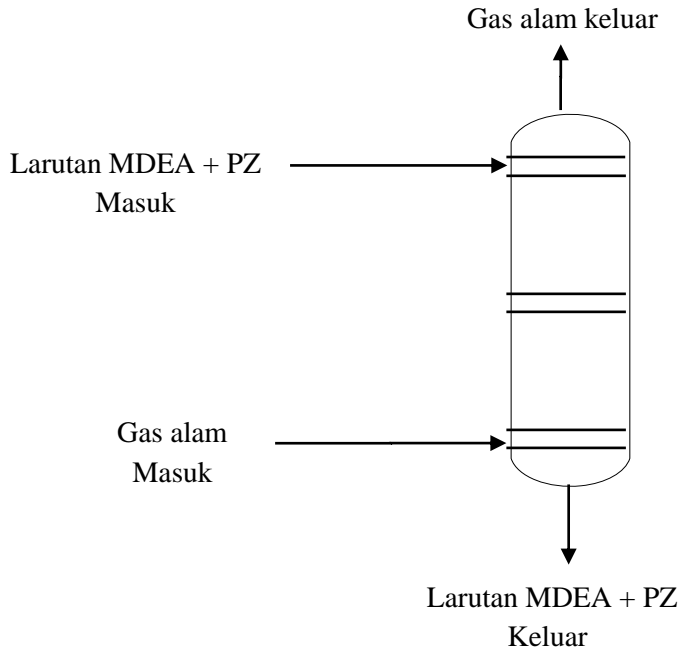
Penelitian ini dilakukan secara teoritis dengan menggunakan model matematik proses absorpsi gas CO<sub>2</sub> dari gas alam ke dalam pelarut MDEA dengan penambahan promotor PZ di dalam *tray column* dalam kondisi isothermal. Simulasi ini bisa dipergunakan untuk merancang absorber dan melakukan optimasi pengoperasian unit absorber. Sistem yang dipelajari yaitu *tray column* dengan diameter, tinggi, dan jenis *tray*. Langkah-langkah penelitian dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 3.1** Langkah - langkah pembuatan model matematik untuk proses absorpsi gas CO<sub>2</sub> dari gas alam ke dalam larutan MDEA dengan promotor PZ di dalam *sieve tray*.

### 3.1. Sistem yang Ditinjau

Sistem yang ditinjau adalah sistem kolom absorber yang ditunjukkan seperti gambar berikut:

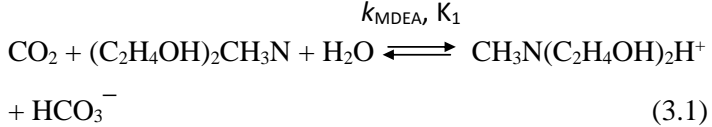


**Gambar 3.2** Sistem Absorpsi Gas  $\text{CO}_2$  dari Gas Alam ke dalam Larutan MDEA dengan promotor PZ di dalam *sieve tray*.

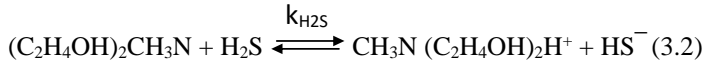
### 3.2. Model Matematika

#### 3.2.1. Sistem Reaksi Kimia

Mekanisme reaksi dari absorpsi CO<sub>2</sub> dengan menggunakan promotor PZ dalam larutan MDEA adalah sebagai berikut:



Sedangkan reaksi terhadap H<sub>2</sub>S yang terjadi di badan liquid juga merupakan reaksi reversible seperti berikut (*Austgen and Rochelle, 1991*):



Dalam sistem CO<sub>2</sub>- H<sub>2</sub>S-MDEA-PZ tidak terjadi reaksi kimia antara CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S.

### 3.2.2. Data Kinetika Reaksi

Persamaan koefisien kecepatan reaksi untuk gas CO<sub>2</sub> terhadap larutan MDEA, menggunakan hasil eksperimen menurut model umum, diperkirakan dengan persamaan Arrhenius:

$$k_{\text{MDEA}} = 5,86 \times 10^6 \times \exp\left(-\frac{3984}{T_F}\right) \quad (3.3)$$

$$k_{\text{PZ}} = 2,81 \times 10^{10} e^{(-5800/T)} \quad (3.4)$$

Sedangkan koefisien kecepatan reaksi untuk gas H<sub>2</sub>S terhadap larutan MDEA adalah:

$$k_{\text{H}_2\text{S}} = 10 \times k_{\text{MDEA}} \quad (3.5)$$

### 3.3. Data Perpindahan Massa

Estimasi koefisien difusi di dalam campuran gas oleh Taylor dan R. Krishna (1993) yaitu sebagai berikut:

$$D_L = 7,4 \times 10^{-8} \frac{(\phi M_{H_2O})^{0,5} T}{\mu_{H_2O} V_{gas}^{0,6}} \quad (3.6)$$

$$D_G = \frac{10^{-7} T^{-1,75} \left( \frac{1}{MW_i} + \frac{1}{MW_j} \right)^{0,5}}{P \times (V_i^{1/3} + V_j^{1/3})} \quad (3.7)$$

Koefisien perpindahan massa sisi gas ( $k_G$ ) untuk *tray column* proses absorpsi diperoleh dari korelasi Sharma & Gupta (1967) untuk  $CO_2$  terlarut berkisar 0,015 sampai 0,045  $gmol/cm^2 \cdot atm$ . Sedangkan nilai  $k_G$  pada *sieve tray* untuk beberapa jenis gas berkisar  $1 \times 10^{-4}$  sampai  $4,5 \times 10^{-4}$   $gmol/cm^2 \cdot atm$ .

$$k_G CO_2 = 0,045 \frac{gmol}{cm^2} \cdot atm \quad (3.8)$$

Koefisien perpindahan massa fase cair diperoleh dari persamaan yang diberikan Calderbank dan Moo-Young (1961):

$$k_L = 0,31 (gv)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{D_A}{v} \right)^{2/3} \quad (3.9)$$

Dimana  $v = \mu/\rho$

Untuk menghitung *interfacial area* ( $a''$ ) berdasarkan perhitungan Calderbank pada *sieve tray* adalah sebagai berikut:



$$\alpha'' = 0,38 \left(\frac{u}{u_r}\right)^{0,775} \left(\frac{u\rho}{n d \mu}\right)^{0,125} \left(\frac{g\rho}{d\sigma}\right)^{1/3} cm^{-1} \quad (3.10)$$

### 3.4. Data Kelarutan Komponen

Data pada penelitian ini yaitu data kelarutan gas dalam larutan MDEA/PZ diperoleh dari hukum *Henry*

$$P_A^* = \frac{He.C_A^*}{C} \quad (3.11)$$

Dengan memperhatikan tahanan pada sisi liquid dan gas, maka untuk mendapatkan konsentrasi CO<sub>2</sub> pada *interface* bisa didapatkan dari persamaan berikut:

$$C_{Ai} = \frac{k_G y_A P + Ek_L C_A^0}{Ek_L + k_G He} \quad (3.12)$$

dengan data konstanta Henry pada air murni (He<sup>0</sup>) pada suhu T masing-masing gas bisa didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$He^o_T = He^o_{298} * \exp\left(\frac{-d \ln kH}{d(1/T)} * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right) \quad (3.13)$$

Dimana nilai He bisa didapatkan berdasarkan persamaan berikut:

$$\log\left(\frac{H_e}{H_e^0}\right) = h_1 I_1 + h_2 I_2 \quad (3.14)$$

**Tabel 3.1** Nilai konstanta Henry air murni pada T=298 K  
tiap komponen

Komponen	$\text{He}^o_{298\text{K}}$ (mol/cm <sup>3</sup> .atm)	$-\text{d} \ln \text{KH}/\text{d}(1/T)$ (K)
CO <sub>2</sub>	$3.6 \cdot 10^{-5}$	2200
CO	$9.9 \cdot 10^{-7}$	1300
H <sub>2</sub>	$7.8 \cdot 10^{-7}$	500
N <sub>2</sub>	$6.1 \times 10^{-7}$	1300
CH <sub>4</sub>	$1.4 \times 10^{-6}$	1600
Ar	$1.4 \times 10^{-6}$	1500

(Rolf Sander, 1999)

Sedangkan  $h_1$  dan  $h_2$  adalah konstanta yang merupakan hasil penjumlahan harga  $h$  spesies ion positif dan ion negatif serta spesies gas

$$h = h_+ + h_- + h_G \quad (3.15)$$

dimana:  $h_+$  (MDEAH<sup>+</sup>) = 0,041 dm<sup>3</sup>/mol

$h_-$  (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) = 0,021 dm<sup>3</sup>/mol

$h_G$  (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) = 0,021 dm<sup>3</sup>/mol

untuk konstanta  $h_G$  yang bergantung pada suhu (T) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$h_G = h_{G,0} + h_T^*(T-298,15) \quad (3.16)$$

**Tabel 3.2** Nilai  $h_G$  dan  $h_T$  tiap komponen

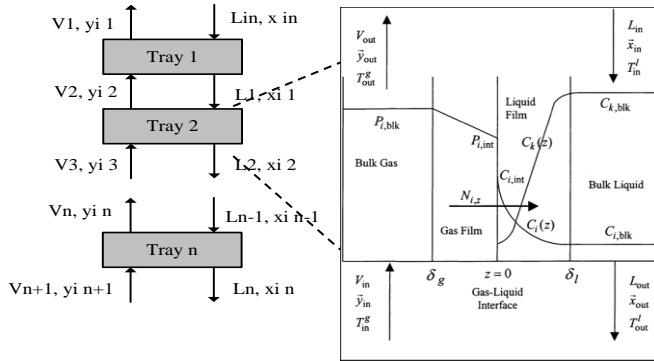
Komponen	$h_{G,0}$ (cm <sup>3</sup> /mol)	$h_T$ (cm <sup>3</sup> /mol.K)
CO <sub>2</sub>	-17.2	-0.338

CO	-	-
H <sub>2</sub>	-21.8	-0.299
N <sub>2</sub>	-1	-0.605
CH <sub>4</sub>	2.2	-0.524
Ar	5.7	-0.485

(Weisenberger, 1996)

### 3.5. Pengembangan Model Matematis Proses

#### Absorpsi Pada Tray Column



**Gambar 3.3** Skema untuk Tray Absorber

Nadhir, dkk., (2001) menentukan persamaan neraca massa untuk komponen liquid dan gas sebagai berikut:

Neraca massa sisi liquid :

$$L_{i,in}x_{i,in} + N_{i,z} + r_iav = L_{i,out}x_{i,out} \quad (3.17)$$

Neraca massa sisi gas :

$$V_{i,in}y_{i,in} = V_{i,out}y_{i,out} + N_{i,z} \quad (3.18)$$

Dalam setiap tray, perhitungan didasarkan pada perhitungan reaktor seri tangki berpengaduk (*continnuos stirred tank reactor/ CSTR*) jumlah tertentu (N).

Secara rinci, persamaan-persamaan neraca massa tiap komponen dalam fase liquid dan gas bisa dituliskan sebagai berikut:

Neraca massa di sisi liquid:

Untuk  $i = \text{MDEA}$ ,  $r = r_1 + r_2$

$$L_{j-1} \cdot C_{i,j-1} - L_j \cdot C_{i,j} - (r)(V) = 0 \quad (3.19)$$

Untuk  $i = \text{MDEAH}^+$ ,

$$L_{j-1} C_{i,j-1} - L_j C_{i,j} + r(V) = 0 \quad (3.20)$$

Untuk  $i = \text{HCO}_3^-$

$$L_{j-1} C_{i,j-1} - L_j C_{i,j} + r_1(V) = 0 \quad (3.21)$$

Untuk  $i = \text{HS}^-$

$$L_{j-1} C_{i,j-1} - L_j C_{i,j} + r_2(V) = 0 \quad (3.22)$$

Untuk  $i = \text{CO}_2, \text{H}_2\text{S}$

$$L_{j-1} C_{i,j-1} - L_j C_{i,j} + N_i aV - r_1 V = 0 \quad (3.23)$$

Neraca Massa di sisi gas:

Untuk I = CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S dan N<sub>2</sub>

$$V_{i,j+1}Y_{i,j+1} - V_{i,n}Y_{i,n} - N_i aV = 0 \quad (3.24)$$

Dengan menggunakan pendekatan *enhancement factor* flux ( $N_{i,z}$ ) dari gas terlarut  $i$  diperoleh dari hubungan persamaan (Baniadam, 2009) sebagai berikut:

$$N_i = E \times k_L \times a \times V (CO_2 - CO_{2(eq)}) \quad (3.25)$$

Penelitian ini menggunakan pendekatan (simulasi) dengan pengembangan model matematik untuk fenomena transfer massa dan panas disertai reaksi kimia dalam proses absorpsi CO<sub>2</sub> pada kondisi isothermal. Asumsi yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

- *Steady state*
- Isothermal
- Perhitungan tiap *tray* didasarkan pada perhitungan CSTR
- Jumlah solven yang menguap diabaikan
- Tekanan yang melalui kolom konstan

### 3.6. Penyelesaian Numerik

Penyelesaian dari simulasi dan pemodelan ini menggunakan sitem persamaan aljabar. Sistem persamaan ini diselesaikan secara iteratif dimulai dari *tray* paling bawah.

### **3.7. Pembuatan Program**

Penyelesaian model matematis dari persamaan-persamaan yang telah disebutkan diatas dibuat dalam program Matlab.

### **3.8. Validasi Data**

Validasi dilakukan dengan cara membandingkan data hasil prediksi simulasi dengan data hysys.

### **3.9. Analisa Model Matematis**

Model matematis yang telah dikembangkan akan digunakan untuk menganalisa proses yang terjadi di pabrik.

### **3.10. Variabel Penelitian**

#### **3.10.1. Sistem yang dipelajari**

- Jenis Tray : *Sieve*
- Tinggi Kolom : 230 cm
- Diameter Kolom : 10 cm
- Jumlah Tray : 6
- Tinggi Weir : 4 cm
- Panjang Weir : 6 cm
- Jarak antar tray : 30 cm

#### **3.10.2. Variabel tetap**

- Laju alir gas masuk : 36.76 Nm<sup>3</sup>/jam
- Laju alir liquid masuk : 0.019 m<sup>3</sup>/jam

- Fraksi mol komponen feed gas masuk:
  - CO<sub>2</sub> : 0,01
  - H<sub>2</sub>S : 0,01
  - CH<sub>4</sub> : 0,98

### 3.10.3. Variabel berubah

- Suhu (K): 303, 313, 323, 333, 343
- Tekanan (atm): 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60
- Konsentrasi MDEA (% wt): 20, 30, 40, 50
- Konsentrasi Pz (% wt): 1, 2, 3, 4, 5

### 3.10.4. Variabel respons (output)

- % *removal* CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S
- Distribusi konsentrasi komponen pada *tray column*

## **BAB IV**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

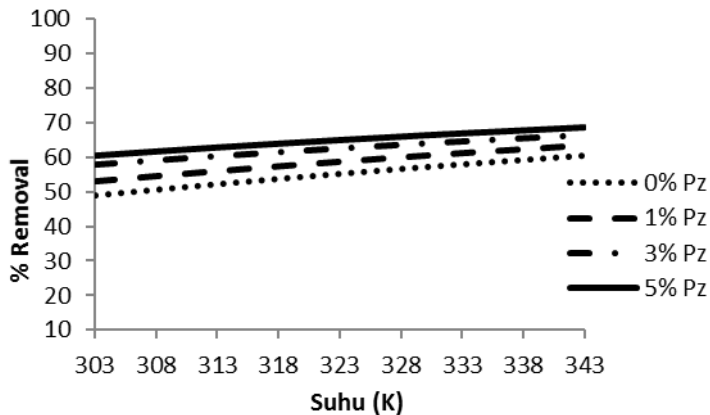
Penggunaan model film dengan pendekatan *enhancement factor* secara simulasi yang dilakukan pada penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara teoritis keterkaitan antara proses absorpsi gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S dengan menggunakan larutan *Methyldiethanolamine* (MDEA) berpromotor piperazine dalam *sieve tray* dengan variabel-variabel yang dapat mempengaruhi proses. Berdasarkan hasil simulasi ini dapat diketahui pengaruh berbagai kondisi operasi kolom terhadap performa kolom yang dinyatakan dalam % removal dan konsentrasi gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S keluar kolom. Untuk membatasi masalah yang akan dibahas maka digunakan asumsi-asumsi sebagai berikut: proses absorpsi terjadi pada kondisi *steady state*, fase liquid mengandung komponen *non-volatile* sehingga tidak ada cairan yang menguap dan tidak ada energi yang hilang karena evaporasi, pola aliran liquid adalah *plug-flow*, reaksi pada fase liquid seluruhnya terjadi dalam film, properti fisik dari fase gas bergantung pada suhu dan mengasumsikan gas ideal, dan reaksi berlangsung dalam kondisi isothermal. Sistem yang dipelajari pada penelitian ini adalah hasil simulasi dengan program Matlab dibandingkan dengan program Hysys. Variabel-variabel yang digunakan



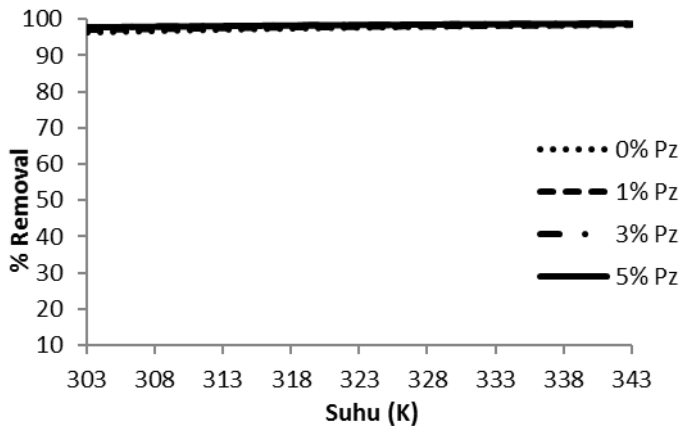
adalah suhu pelarut (K), tekanan operasi (atm), konsentrasi MDEA (% wt), konsentrasi PZ (% wt).

#### 4.1 Pengaruh Suhu Pelarut (K) Terhadap *Percent Removal*

Berdasarkan hasil simulasi didapatkan hubungan antara suhu terhadap *percent removal* gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S yang ditunjukkan pada gambar 4.1 dan 4.2.



**Gambar 4.1** Pengaruh suhu larutan MDEA terhadap *percent removal* CO<sub>2</sub>. Tekanan 40 atm, suhu gas 303 K, konsentrasi MDEA 40% wt.



**Gambar 4.2** Pengaruh suhu larutan MDEA terhadap *percent removal* H<sub>2</sub>S. Tekanan 40 atm, suhu gas 303 K, konsentrasi MDEA 40%wt.

Berdasarkan Gambar 4.1 dan 4.2 dapat dilihat bahwa meningkatnya suhu pelarut maka dapat meningkatkan %removal gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S. Hal ini dikarenakan dengan meningkatnya suhu maka terjadi peningkatan pada laju reaksi, sehingga semakin banyak jumlah gas CO<sub>2</sub> yang bereaksi dengan solven yang mengakibatkan meningkatnya %removal gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S. Hasil ini berkorelasi positif dengan hasil literatur bahwa konstanta laju reaksi dari MDEA dengan gas CO<sub>2</sub> merupakan fungsi suhu.

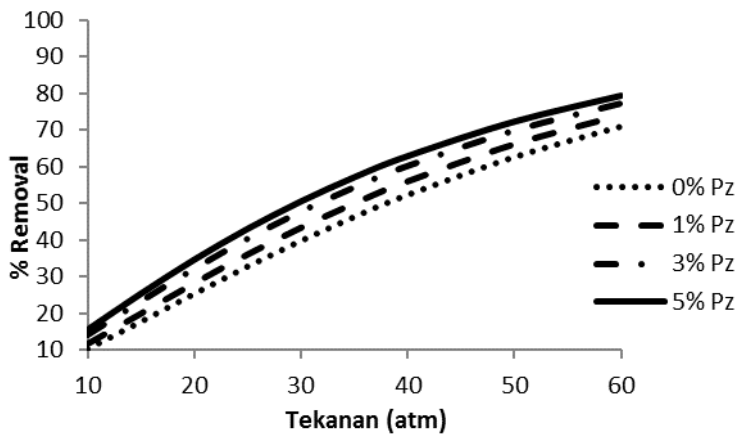
Namun kita juga harus memperhatikan faktor kelarutan gas, berdasarkan literatur kelarutan suatu gas di dalam cairan

dipengaruhi oleh suhu. Dimana jika suhunya tinggi maka kelarutan gas di dalam cairan akan semakin kecil begitu pula jika diturunkan maka kelarutan gas akan semakin meningkat. Hal ini terjadi karena pada suhu tinggi molekul gas bergerak semakin cepat sehingga mudah meninggalkan pelarutnya. Tetapi jika melihat gambar 4.1 maupun 4.2 dengan adanya peningkatan suhu maka %removal cenderung meningkat, hal ini menunjukkan bahwa pengaruh laju reaksi lebih besar dibandingkan kelarutan gas terhadap %removal. Selain itu, peningkatan suhu dapat meningkatkan nilai dari konstanta difusivitas gas. Akibat dari peningkatan nilai ini, maka laju perpindahan massa pada sisi liquid lebih mudah terjadi sehingga secara tidak langsung dapat meningkatkan laju absorpsi.

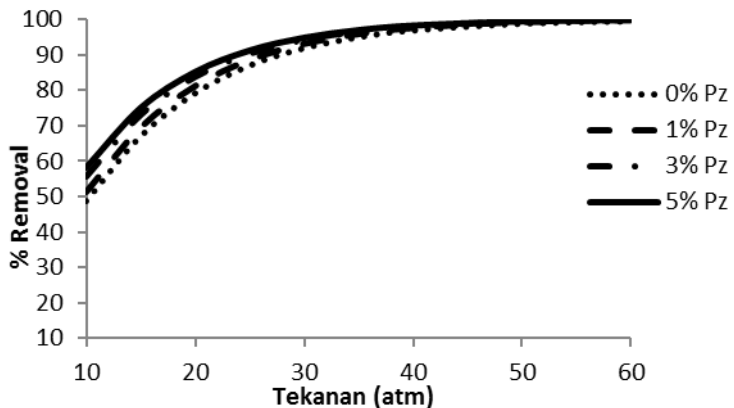
Bila kita memperhatikan antara grafik 4.1 dan 4.2 pengaruh suhu pada  $\text{H}_2\text{S}$  mendapatkan %removal yang lebih tinggi dibandingkan  $\text{CO}_2$ . Hal ini disebabkan reaksi antara  $\text{H}_2\text{S}$  dengan MDEA berlangsung secara spontan, sedangkan  $\text{CO}_2$  bereaksi secara lambat dengan MDEA maka dari itu ditambahkan promotor ke dalam larutan MDEA untuk meningkatkan %removal  $\text{CO}_2$  secara signifikan.

## 4.2 Pengaruh Tekanan (atm) Terhadap *Percent Removal*

Berdasarkan simulasi yang dilakukan, didapatkan hubungan antara tekanan berdasarkan *percent removal* yang ditunjukkan oleh gambar 4.3 dan 4.4



**Gambar 4.3** Pengaruh tekanan larutan MDEA terhadap *percent removal* CO<sub>2</sub>. Suhu larutan 313 K, suhu gas 303 K, konsentrasi MDEA 40% wt.



**Gambar 4.4** Pengaruh tekanan larutan MDEA terhadap *percent removal* H<sub>2</sub>S. Suhu larutan 313 K, suhu gas 303 K, konsentrasi MDEA 40% wt.

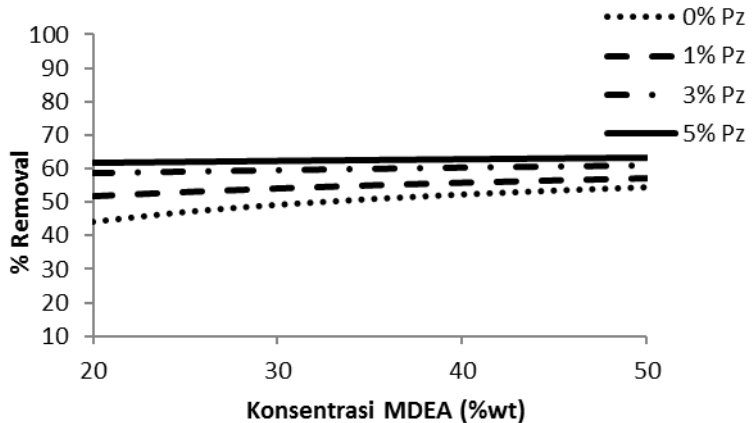
Berdasarkan gambar 4.3 dan 4.4 dapat dilihat bahwa meningkatnya tekanan operasi maka dapat meningkatkan %removal gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S. Hal ini dikarenakan seiring meningkatnya tekanan maka kelarutan gas dalam cairan akan meningkat, begitupun sebaliknya. Kelarutan gas dalam cairan ini meningkat karena jika tekanan ditingkatkan berarti nilai diffusivitas juga akan semakin meningkat, sehingga seolah-olah gas dipaksa untuk masuk ke dalam larutan.

Bila kita memperhatikan antara gambar 4.3 dan 4.4 pengaruh tekanan terhadap H<sub>2</sub>S mendapatkan %removal yang lebih tinggi dibandingkan CO<sub>2</sub>. Namun, pengaruh penambahan promotor PZ terhadap kenaikan tekanan pada gas H<sub>2</sub>S tidak menimbulkan kenaikan yang signifikan hal ini disebabkan karena kelarutan H<sub>2</sub>S lebih dipengaruhi dengan peningkatan nilai kelarutan dibandingkan dengan kenaikan yang disebabkan oleh peningkatan laju reaksi dengan adanya promotor PZ. Sedangkan pada gas CO<sub>2</sub> terjadi kenaikan antara penyerapan dengan menggunakan promotor atau tidak pada proses operasi tekanan tinggi. Hal ini dikarenakan dengan adanya penambahan promotor maka reaksi antara MDEA

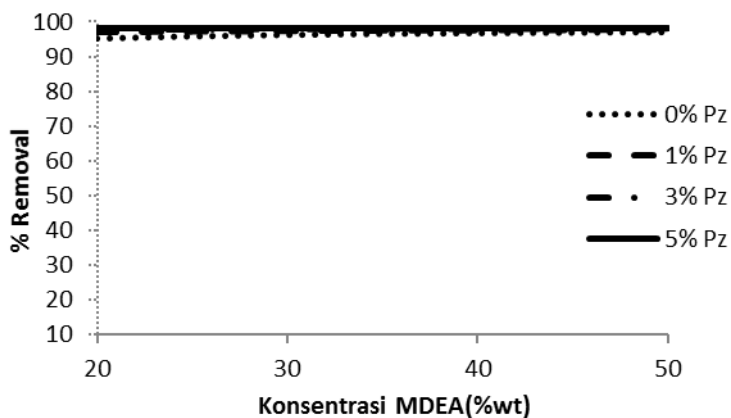
dengan CO<sub>2</sub> berjalan lebih cepat disertai meningkatnya nilai dari kelarutan gas ke dalam solven.

#### 4.3 Pengaruh Konsentrasi MDEA (%wt) Terhadap *Percent Removal*

Hasil yang diperoleh dari simulasi mendapatkan hubungan antara konsentrasi MDEA (% wt) terhadap *percent removal* yang ditunjukkan oleh gambar 4.5 dan 4.6



**Gambar 4.5** Pengaruh konsentrasi MDEA (%wt) terhadap *percent removal* CO<sub>2</sub>. Suhu larutan 313 K, suhu gas 303 K, tekanan 40 atm.

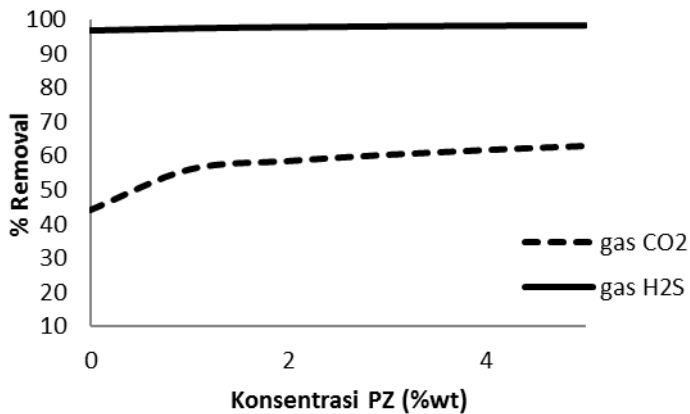


**Gambar 4.6** Grafik pengaruh konsentrasi MDEA (%wt) terhadap *percent removal* H<sub>2</sub>S. Suhu larutan 313 K, suhu gas 303 K, tekanan 40 atm.

Berdasarkan Gambar 4.5 dan 4.6 dapat dilihat bahwa meningkatnya konsentrasi MDEA (%wt) maka dapat meningkatkan %removal gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S. Hal ini dikarenakan bertambahnya konsentrasi akan meningkatkan laju penyerapan dari gas CO<sub>2</sub>, dalam hukum aksi massa dijelaskan bahwa jika jumlah perbandingan antara reaktan dengan produk sangat besar maka reaktan bisa dianggap konstan sehingga disebut sebagai reaksi orde satu semu  $k_1=k_2C_B^0$ . Dimana konsentrasi reaktan disemua tempat dalam fase liquid adalah  $C_B^0$ .

#### 4.4 Pengaruh Konsentrasi Piperazine (%wt) Terhadap *Percent Removal*

Berdasarkan hasil simulasi didapatkan hubungan antara suhu terhadap *percent removal* gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S yang ditunjukkan pada gambar 4.7 dan 4.8



**Gambar 4.7** Pengaruh konsentrasi PZ (%wt) terhadap *percent removal* CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S. Suhu larutan 313 K, suhu gas 303 K, tekanan 40 atm dan konsentrasi MDEA 40% wt.

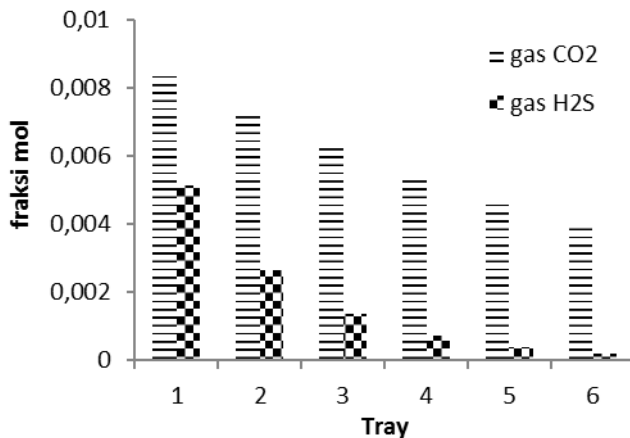
Berdasarkan gambar 4.7 dapat dilihat bahwa dengan peningkatan konsentrasi PZ maka dapat meningkatkan %removal. Hal ini disebabkan karena PZ berperan sebagai promotor pada pelarut absorpsi yang disertai reaksi pada sistem larutan MDEA. Pada grafik terlihat bahwa terjadi kenaikan begitu signifikan pada %removal CO<sub>2</sub> dari 0-3%wt sedangkan pada rentang 3-5%wt cenderung akan menuju



konstan. Sedangkan pada %removal  $\text{CO}_2$  kenaikan yang terjadi tidak begitu signifikan karena reaksi antara gas  $\text{H}_2\text{S}$  dengan larutan MDEA sudah berlangsung secara spontan maka promotor tidak berpengaruh besar.

#### 4.5 Distribusi Konsentrasi Komponen Dalam Gas

Pada hasil simulasi dengan kondisi yang konstan yaitu suhu 313 K, tekanan 40 atm, konsentrasi MDEA 40%wt dan konsentrasi PZ 3%wt dapat diketahui nilainya pada setiap tray. Gas yang akan diabsorp dilewatkan melalui bagian bawah kolom terhitung tray ke-1 dan tray paling atas adalah tray-6. Dibawah ini adalah hasil simulasi yang dinyatakan dalam fraksi mol pada tiap tray dengan menggunakan pendekatan *enhancement factor*.

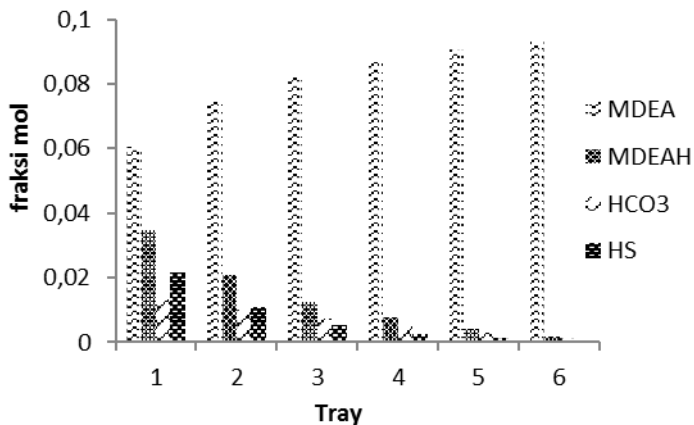


**Gambar 4.8** Distribusi konsentrasi komponen gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S di dalam *tray column*.

Berdasarkan gambar 4.8 nilai fraksi mol gas CO<sub>2</sub> mengalami penurunan dari tray 1 sampai tray 4 dan cenderung konstan pada tray ke 4 hingga tray ke 6. Dari data tersebut menunjukkan bahwa gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S dari tray ke 1 hingga ke tray 6 semakin banyak gas yang terabsorpsi oleh MDEA. Konsentrasi CH<sub>4</sub> pada tiap tray dianggap sama atau tetap karena tidak terjadi absorpsi dan reaksi antara CH<sub>4</sub> dan MDEA.

#### **4.6 Distribusi Konsentrasi Komponen Dalam Liquid**

Pada hasil simulasi dengan kondisi yang konstan yaitu suhu 313 K, tekanan 40 atm, konsentrasi MDEA 40%wt dan konsentrasi PZ 3%wt dapat diketahui nilainya pada setiap tray. Liquid sebagai absorben akan dilewatkan melalui bagian atas kolom terhitung tray ke-6 dan tray paling bawah adalah tray-1. Dibawah ini adalah hasil simulasi yang dinyatakan dalam fraksi mol pada tiap *tray* dengan menggunakan pendekatan *enhancement factor*.



**Gambar 4.9** Distribusi konsentrasi komponen liquid di dalam *tray column*

Berdasarkan gambar 4.9 nilai fraksi mol MDEAH dan  $\text{HCO}_3$  yang terbentuk dari reaksi  $\text{CO}_2$  dengan MDEA mengalami kenaikan dari tray 4 sampai tray 1 sedangkan pada tray 5 dan 6 bikarbonat masih sedikit yang terbentuk. Hal ini diperkuat dengan adanya penurunan fraksi mol dari MDEA dari tray ke 6 hingga tray ke 1. Begitu pula untuk HS, fraksi mol yang terbentuk semakin naik seiring dengan bertambahnya tray yang diiringi dengan penurunan fraksi dari MDEA. Keadaan ini menunjukkan bahwa adanya reaksi yang terjadi antara gas  $\text{CO}_2$  dengan MDEA pada tray 1 hingga tray 4 sedangkan pada tray 5 dan 6 kesetimbangan reaksi antara  $\text{CO}_2$  dengan MDEA telah dicapai.

#### 4.7 Data Perbandingan Simulasi MATLAB dengan HYSYS

Simulasi menggunakan program Matlab dibandingkan dengan program Hysys dengan hasil sebagai berikut:

**Tabel 4.1** Perbandingan hasil simulasi MATLAB dengan HYSYS:

Variabel Pembanding	Hasil Simulasi Skala Laboratorium	
	MATLAB v6.1	HYSYS v7.3
Laju alir liquid ( $\text{m}^3/\text{hr}$ )	0,019	0,019
Laju alir gas ( $\text{Nm}^3/\text{hr}$ )	36,76	36,76
Tekanan (atm)	40	40
Suhu MDEA (K)	313	313
Suhu gas (K)	303	303
Konsentrasi Absorben (% wt)	40%	40%
Konsentrasi Piperazine (% wt)	3%	3%
%Removal $\text{CO}_2$	60,05	65
%Removal $\text{H}_2\text{S}$	97,99	93

Hasil perbandingan pada tabel 4.1 menunjukkan adanya deviasi %removal pada  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$  masing-masing sebesar

4,63% dan 5,34%. Deviasi tersebut salah satunya disebabkan perhitungan pada Hysys yang dalam programnya sudah terdapat data-data properties untuk tiap komponen yang digunakan dan juga adanya *fluid package* yang digunakan, dimana pemilihan *fluid package* ini tergantung dari komponen apa yang digunakan dalam proses absorpsi. Selain itu, pada perhitungan Matlab dianggap gas ideal, sedangkan pada Hysys properties gas dianggap gas nyata. Serta, proses reaksi dari tiap komponen sudah dihitung secara otomatis oleh Hysys, itulah beberapa perbedaan yang menjadi faktor adanya deviasi setelah dibandingkan menggunakan Hysys.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1. Kesimpulan**

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dibuat, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada penelitian ini digunakan model film dengan pendekatan *enhancement factor* di dalam proses absorpsi gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S menggunakan larutan MDEA dengan promotor Piperazine pada *sieve tray*
2. Hasil simulasi ini telah dikaji secara teoritis pengaruhnya terhadap kinerja kolom dengan beberapa variabel operasi yaitu:
  - Dengan meningkatkan suhu 303 K hingga 333 K akan meningkatkan %removal CO<sub>2</sub> sebesar 57,73-64,66% dan H<sub>2</sub>S 97,62-98,58%.
  - Jika tekanan dinaikan 10 hingga 40 atm akan meningkatkan %removal dari CO<sub>2</sub> sebesar 13,99-60,28% dan H<sub>2</sub>S sebesar 55,41-97,99%.
  - Dengan menaikkan konsentrasi MDEA dari 20%wt hingga 50%wt akan menaikkan %removal CO<sub>2</sub> 58,54-60,94% dan H<sub>2</sub>S sebesar 97,82-98,06%.
  - Jumlah Pz yang ditambahkan mampu meningkatkan %removal CO<sub>2</sub> secara signifikan

hingga penggunaan 3% wt sebesar 60,28% dan H<sub>2</sub>S sebesar 97,99%.

3. Dari hasil perbandingan dengan hysys %removal yang dihasilkan menunjukan adanya deviasi pada proses absorpsi gas CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S masing-masing sebesar 4,63% dan 5,34%. Hal ini disebabkan perbedaan dalam metode perhitungan pada hysys yang dalam programnya sudah terdapat data-data properties untuk tiap komponen yang digunakan dan juga adanya *fluid package* yang digunakan, dimana pemilihan *fluid package* ini tergantung dari komponen apa yang digunakan dalam proses absorpsi. Serta, proses reaksi dari tiap komponen sudah dihitung secara otomatis oleh hysys, itulah beberapa perbedaan yang menjadi faktor adanya deviasi setelah dibandingkan menggunakan hysys.

## 5.2. Saran

1. Melakukan validasi data dengan data hasil percobaan untuk meningkatkan akurasi pada model matematis yang dibuat
2. Simulasi ditambah dengan unit stripper untuk mengevaluasi kinerja dari unit CO<sub>2</sub> removal secara keseluruhan

3. Melakukan perbandingan pendekatan model dengan menggunakan persamaan *Maxwell-stefan* yang mempertimbangkan interaksi antar molekul didalam perhitungannya.



(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

## DAFTAR PUSTAKA

- Astarita, G., 1967. *Mass Transfer With Chemical Reaction*. Amsterdam: Elsevier Publishing Company.
- Altway, A., 2008. *Perpindahan Massa Disertai Reaksi Kimia*. Jakarta: BeeMarketer Institute.
- Al-Baghli, N.A., Pruess, S. A., Yesavage, V. F., & Selim, M. S., 2001. *A Rate-Based Model for The Design of Gas Absorber for The Removal of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S Using Aqueous Solutions of MEA and DEA*. Colorado: Elsevier publishing company, 185, 31-43.
- Austgen, M. David., Rochelle, T. Gary., 1991. *Model of Vapor-Liquid Equilibria for Aqueous Gas-Alkanolamine System*. Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 30, No. 3, pp 543-555.
- Baniadam, M., Fathikalajahi ,J., dan Rahimpour, M. R., 2009. *Incorporation of Eulerian-Eulerian CFD Framework in Mathematical Modeling of Chemical Absorption of Acid Gases Into Methyl Diethanol Amine on Sieve Trays*. Shiraz: Chemical Engineering Journal, 151, 286-294.
- Bishnoi, S., and Rochelle, G. T., 2000. *Carbon Dioxide Absorption and Solution Equilibrium in Piperazine Activated Methyl diethanolamine*. Austin: The University of Texas.
- Borhani, T.N.G., Afkhamipour, M., Azapour, A., & Manan, Z. A., 2016. *Modeling Study on CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S*

- Simultaneous Removal Using MDEA Solution*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 24, 344-355.
- Dankckwerts, P.V. 1970. *Gas-Liquid Reaction*. New York: Mc Graw-Hill book Company.
- Fuller, N., Edward, Paul, D., Schettler. 1966. *A New Method For Prediction Of Binary Gas-Phase Diffusion Coefficients*. Industrial and Chemical Engineering. Vol. 58. Utah.
- Górak, A., and Kenig, E.Y., 2005. *Integrated Chemical Processes: Synthesis, Operation, Analysis, and Control*. P. 265-311.
- Ibrahim, A.Y et al, 2014. *Effects of Piperazine on Carbon Dioxide Removal from Natural Gas Using Aqueous Methyl Diethanol Amine*. Journal of Natural Gas Science and Engineering 21, 894-899.
- Kohl, A., and Nielsen, R., 1997. *Gas Purification*. Texas: Gulf Publishing Company Houston.
- Lide, D. R. and H. P. R. Frederikse., 1995. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 76th Edition. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL.
- Perry, R.H., Green, D.W., 2008. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 7th Edition. Mc Graw-Hill.
- Rinker, E.B., 1994. *Kinetics and Modelling of Carbon Dioxide Absorption into Aqueous Solutions of N-Methyldiethanolamine*. California: Elsevier Science Ltd. Vol.50 No.5, pp 755-768.
- Rozi, M. 2009. *Simulasi Absorpsi CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S dengan Larutan MDEA dalam Kolom Sieve-Tray*.

- Taylor, S., Krisna, R., 1982. *Calculation of Multicomponent Mass Transfer at High Transfer Rates*. The Chemical Engineering Journal. Volume 25, Issue 1, Pages 47-54.
- Van Loo, S. 2007. *The Removal of Carbon Dioxide with Activated Solution of Methyl-Diethanol-Amine*. Journal of Petroleum Science and Engineering 55, 135-145.
- Weisenberger, S, dan A. Schumpe. 1996. *Estimation of Gas Solubilities in Salt Solutions at Temperatures from 273 K to 363 K*. *AIChE J.* 42 (1), 298–300.
- Wilhelm, E., R. Battino, and R. J. Wilcock. 1977. *Low Pressure Solubility of Gases in Liquid Water*. *Chem. Rev.*, 77 , 219–262.

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

## DAFTAR NOTASI

$a$	: <i>specific area</i> per unit volume dari <i>packed column</i> , $\text{m}^2.\text{m}^{-3}$
$A$	: luas penampang kolom, $\text{m}^2$
$C_A$	: konsentrasi gas $\text{CO}_2$ dalam badan liquida, $\text{mol}.\text{m}^{-3}$
$C_{A0}$	: konsentrasi gas $\text{CO}_2$ dalam badan liquida awal, $\text{mol}.\text{m}^{-3}$
$C_{Ai}$	: konsentrasi gas $\text{CO}_2$ dalam <i>interface</i> , $\text{mol}.\text{m}^{-3}$
$C_{Ae}$	: konsentrasi gas $\text{CO}_2$ berkesetimbangan dalam liquida, $\text{mol}.\text{m}^{-3}$
$C_B$	: konsentrasi akhir reaktan, $\text{mol}.\text{m}^{-3}$
$C_i$	: konsentrasi ion-ion yang valensinya $z_i$ , $\text{mol}.\text{m}^{-3}$
$C_{Nj-1}$	: konsentrasi dalam reaktor ke N pada tray j-1, $\text{mol}.\text{m}^{-3}$
$C_{Nj}$	: konsentrasi dalam reaktor ke N pada tray j, $\text{mol}.\text{m}^{-3}$
$C_{B0}$	: konsentrasi awal reaktan, $\text{mol}.\text{m}^{-3}$
$C_o$	: konsentrasi gas pada saat $t = 0$ , $\text{mol}.\text{m}^{-3}$
$C_B^o$	: konsentrasi komponen B pada <i>bulk</i> , $\text{mol}.\text{m}^{-3}$
$C_{Rj}$	: konsentrasi molar dari species j pada fasa liquid, $\text{kmol}.\text{m}^{-3}$
$C_P^o$	: konsentrasi komponen produk pada <i>bulk</i> , $\text{mol}.\text{m}^{-3}$
$C_P$	: konsentrasi produk, $\text{mol}.\text{m}^{-3}$
$C_{OH^-}$	: konsentrasi $\text{OH}^-$ , $\text{mol}.\text{m}^{-3}$
$d_i$	: <i>driving force</i> untuk difusi massa, $\text{m}^{-1}$
$D_A$	: koefisien difusi gas $\text{CO}_2$ , $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
$E$	: <i>enhancement factor</i>
$F$	: <i>fluks</i> difusi, $\text{mol}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
$G$	: kecepatan gas superficial, $\text{gmol}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ; aliran total molar gas, $\text{mol s}^{-1}$
$G_T$	: laju alir molar total gas

H	: konstanta Henry untuk reactive solution, $\text{Pa.m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
$H_0$	: konstanta Henry untuk pure water, $\text{Pa.m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
$K_w$	: konstanta kesetimbangan air, $\text{mol.m}^{-3}$
$K_1$	: konstanta kesetimbangan persamaan (2.36) , $\text{mol.m}^{-3}$
$K_3$	: konstanta kesetimbangan persamaan (2.38), $\text{mol.m}^{-3}$
k	: konstanta laju reaksi <i>over-all first-order</i> , $\text{s}^{-1}$
$k_G$	: koefisien perpindahan massa sisi gas, $\text{mol.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
$k_c$	: konstanta kecepatan reaksi katalitik, $\text{lt.gmol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ atau $\text{cm}^3 \cdot \text{gmol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
$k_L$	: koefisien perpindahan massa sisi liquida , $\text{mol. m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
$k_{OH}$ dan $k'_{OH}$	: kostanta kecepatan reaksi, $\text{lt.gmol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ atau $\text{cm}^3 \cdot \text{gmol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
L	: laju alir total molar liquida, $\text{mol/s}$ ; kecepatan superficial liquida, $\text{gmol.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
M	: Bilangan Hatta
$M_j$	: berat molekul komponen j, $\text{kg. kgmole}^{-1}$
$N_{CO_2}$	: Interfacial flux $\text{CO}_2$ per gas-liquid interfacial area, $\text{kmol.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
$N_{i,z}$	: Fluks molar i ke arah Z, $\text{kmol.m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
$n_g$	: Total jumlah komponen pada fasa gas
$n_L$	: Total jumlah komponen pada fasa liquid
$n_p$	: Total jumlah produk reaksi pada fasa liquid
$n_R$	: Total jumlah reaktan pada fasa liquid
P	: Tekanan total, bar
$P_A$	: tekanan parsial gas $\text{CO}_2$ , Pa
$P_{Ai}$	: tekanan parsial gas $\text{CO}_2$ pada <i>interface</i> , Pa
Q	: notasi matrik metode kolokasi orthogonal
r	: kecepatan reaksi gas persatuan volume, $\text{mol.m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
$r_A$	: laju reaksi A per unit volume, $\text{gmol.m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$

$r_{OH}$	: laju reaksi untuk $K_2CO_3$ dengan <i>amine</i> , $\text{gmol.m}^{-3} \text{ s}^{-1}$
$r_1, r_2$	: laju reaksi
$R$	: laju absorpsi per unit luas permukaan setelah waktu kontak $t$ , $\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$
$\bar{R}$	: laju absorpsi rata-rata dalam waktu kontak $t$ , $\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$
$t$	: waktu, s
$T$	: temperatur, K
$V$	: volume liquida, $\text{m}^3$
$V$	: Laju alir total molar gas, $\text{kmol.s}^{-1}$
$x$	: koordinat film dari <i>interface</i> ke bulk liquida, m
$x$	: mol fraksi fasa liquida
$x_j$	: fraksi molar komponen $j$ di fasa liquid
$y$	: mol fraksi fasa gas
$y_j$	: fraksi molar komponen $j$ di fasa gas
$y_L$	: ketebalan film
$Y_A$	: mol A dalam kolom per mol gas masuk
$Y_k$	: mol k dalam kolom per mol gas masuk
$z$	: valensi ion
$z$	: koordinat aksial, m
$\Delta z$	: tinggi segmen, m

### *Huruf Latin*

$\alpha_j$	: koefisien stoikiometrik komponen $j$
$\varepsilon_L$	: liquid holdup packing, $\text{kg.m}^{-3}$
$\zeta$	: posisi axial tak berdimensi
$\theta$	: waktu kontak elemen liquida-gas <i>interface</i> , $\text{s}^{-1}$
$\Omega$	: crpss sectional tower, $\text{m}^2$
$\delta$	: tebal film difusi, m
$\mu$	: viscositas liquida, $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$



$\pi$	: 22/7
$\rho_L$	: densitas liquida, $\text{kg.m}^{-3}$
$\rho_g$	: densitas gas, $\text{kg.m}^{-3}$
$\emptyset$	: <i>volumetric holdup</i> , $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$
$\Gamma$	: fungsi gamma
$\epsilon$	: <i>difusivitas Eddy</i>
$\sigma$	: Tegangan permukaan

## APENDIKS A

### RUMUS – RUMUS YANG DIGUNAKAN

1. Koefisien perpindahan massa dalam liquid ( $k_L$ )  
(cm/det)

$$k_L CO_2 = 0,31 \times (1000 \times \mu_{MDEA} \times \rho_L) \left( \frac{1}{s} \right) \times \left( \frac{D_{CO_2} \times 0,001 \times \rho_L}{\mu_{MDEA}} \right) \quad (A.1)$$

$$k_L H_2S = 0,31 \times (1000 \times \mu_{MDEA} \times \rho_L) \left( \frac{1}{s} \right) \times \left( \frac{D_{H_2S} \times 0,001 \times \rho_L}{\mu_{MDEA}} \right) \quad (A.2)$$

$$k_L CH_4 = 0,31 \times (1000 \times \mu_{MDEA} \times \rho_L) \left( \frac{1}{s} \right) \times \left( \frac{D_{CH_4} \times 0,001 \times \rho_L}{\mu_{MDEA}} \right) \quad (A.3)$$

2. Flux ( $N_i$ ) dari gas terlarut  $i$

$$RR_{CO_2} = E_{CO_2} \times k_L CO_2 \times a \times VL (CCO_{2int} - CCO_{2eq}) \quad (A.4)$$

$$RR_{H_2S} = E_{H_2S} \times k_L H_2S \times a \times VL (CH_{2Sint} - CH_{2Seq}) \quad (A.5)$$

3. Bilangan Hatta

$$M = \frac{D_{AB} k C_{Bo}}{k_L^2} \quad (A.6)$$

- $D_A$  = koefisien diffusifitas gas  $i$  dalam fase liquida  
 $k_2$  = konstanta laju reaksi  
 $k_L$  = koefisien perpindahan massa pada sisi cair.

(Danckwerts, 1970)

4. **Area interfacial pada sieve tray ( $\text{cm}^{-1}$ )**

$$a'' = 0,38 \left( \frac{u}{u_t} \right)^{0,775} \left( \frac{u \rho}{n d \mu} \right)^{0,125} \left( \frac{g \rho}{d \sigma} \right)^{1/3} \text{cm}^{-1} \quad (\text{A.7})$$

(Danckwerts, 1970)

5. **Konstanta Henry ( $\text{atm.cm}^3/\text{kmol}$ )**

Diketahui Konstanta Henry komponen gas – air:

-  $\text{CO}_2$  – air

$$H_{\text{CO}_2}^0 = 3,6 \times 10^{-2} \exp \left( 2400 \times \left( \left( \frac{1}{TF} \right) - \left( \frac{1}{298} \right) \right) \right) \quad (\text{A.8})$$

-  $\text{H}_2\text{S}$  – air

$$H_{\text{H}_2\text{S}}^0 = 1 \times 10^{-1} \exp \left( 2000 \times \left( \left( \frac{1}{TF} \right) - \left( \frac{1}{298} \right) \right) \right) \quad (\text{A.9})$$

-  $\text{CH}_4$  – air

$$H_{\text{CH}_4}^0 = 1,4 \times 10^{-3} \exp \left( 1600 \times \left( \left( \frac{1}{TF} \right) - \left( \frac{1}{298} \right) \right) \right) \quad (\text{A.10})$$

Dimana nilai  $H_e$  bisa didapatkan berdasarkan persamaan berikut:

$$\log \left( \frac{H_e}{H_e^0} \right) = h_1 I_1 + h_2 I_2 \quad (\text{A.11})$$

6. **Koefisien difusi dalam liquid ( $\text{cm}^2/\text{det}$ )**

$$D_{\text{CO}_2} = 7.4 \times 10^{-8} \frac{TF \times (\rho \times BM \text{ air})^{0,5}}{(\mu A \times MV_{\text{CO}_2})^{0,6}} \quad (\text{A.12})$$

$$D_{\text{CH}_4} = 7.4 \times 10^{-8} \frac{TF \times (\rho \times BM \text{ air})^{0,5}}{(\mu A \times MV_{\text{CH}_4})^{0,6}} \quad (\text{A.13})$$

$$D_{\text{H}_2\text{S}} = 7.4 \times 10^{-8} \frac{TF \times (\rho \times BM \text{ air})^{0,5}}{(\mu A \times MV_{\text{H}_2\text{S}})^{0,6}} \quad (\text{A.14})$$

(Fuller dkk., 1966)

7. Koefisien difusi dalam campuran gas (m<sup>2</sup>/det)

$$DM_{CO_2} = \frac{(1-Y_{CO_2})}{(Y_{CH_4}/DG_{CO_2-H_2S} + Y_{H_2S}/DG_{CO_2-H_2S})} \quad (A.15)$$

$$DM_{H_2S} = \frac{(1-Y_{H_2S})}{(Y_{CO_2}/DG_{CO_2-H_2S} + Y_{CH_4}/DG_{CH_4-H_2S})} \quad (A.16)$$

$$DM_{CH_4} = \frac{(1-Y_{CH_4})}{(Y_{H_2S}/DG_{CH_4-H_2S} + Y_{CO_2}/DG_{CH_4-CO_2})} \quad (A.17)$$

8. Kestimbangan Reaksi

- CO<sub>2</sub> – MDEA (cm<sup>3</sup>/mol.s)

$$k_{MDEA.CO_2} = \left( 5,86 \times 10^6 \times \exp\left(-\frac{3984}{TF}\right) \right) \times 1000 \quad (A.18)$$

- CO<sub>2</sub> – Pz (cm<sup>3</sup>/mol.s)

$$k_{Pz.CO_2} = \left( 2,81 \times 10^{10} \times \exp\left(-\frac{5800}{TF}\right) \right) \times 1000 \quad (A.19)$$

- H<sub>2</sub>S – MDEA (cm<sup>3</sup>/mol.s)

$$k_{MDEA.H_2S} = 10 \times k_{MDEA.CO_2} \quad (A.20)$$

- H<sub>2</sub>S – Pz (cm<sup>3</sup>/mol.s)

$$k_{Pz.H_2S} = 10 \times k_{Pz.CO_2} \quad (A.21)$$

9. Konsentrasi gas pada interface (gmol/cm<sup>3</sup>)

$$C_{Ai} = \frac{k_G P_A y_i + k_L E C_A}{k_L E + k_G H e} \quad (A.22)$$

## 10. Neraca Massa

- Neraca massa komponen liquid :

$$L_{in} x_{in} + N_{i,z} - \text{Generasi} = L_{out} x_{out} \quad (A.23)$$

$$L_{i,in} x_{i,in} + N_{i,z} - r_i V = L_{i,out} x_{i,out} \quad (A.24)$$

- Neraca massa komponen gas :

$$V_{i,in} y_{i,in} = V_{i,out} y_{i,out} + N_{i,z} \quad (A.25)$$

(Al-Baghli, 2001)

## 11. Persen Removal

$$\% \text{ Removal gas } i = \frac{\text{mol gas } i \text{ masuk} - \text{mol gas } i \text{ keluar}}{\text{mol gas } i \text{ masuk}} \times 100\% \quad (A.26)$$

## APENDIKS B

### LISTINGAN PROGRAM (Matlab v6.1)

```
% Program Simulasi Absorpsi Reaktif Gas CO2
dan H2S kedalam Promoted MDEA pada Tray Column
clear
clc
disp('Tentukan variabel yang diinginkan');
N = 6; %jumlah tray
D = 10; %diameter tray dalam cm (data 220 cm)
AK = 3.14*D^2/4; %luas permukaan tray dalam
cm2
hw = 4 ; %tinggi weir dalam cm
TS = 30; %tray spacing dalam cm
Aa=0.67*AK; % Active area
VL=Aa*hw;%volume liquid diatas tray
%TL= input('Suhu liquid (C) = ');
TL=40;
TLIN=TL+273;
%TG= input('Suhu Gas (C) = ');
TG=30;
TGIN=TG+273;
TLL=TLIN;
TGG=TGIN;
%P = input('Tekanan (atm) = ');
P=40;
yCO2in=0.01;
yH2Sin=0.01;
yCH4in=1-yCO2in-yH2Sin;
YYco2in=yCO2in;
YYh2sin=yH2Sin;
YYch4in=yCH4in;
%GV = input (' Laju alir gas masuk = ');
%LV = input (' Laju alir liquid masuk = ');
GV=36.76;% Laju alir gas dalam NM3/hr
%LV=input('LV=');
LV=0.019;% Laju alir liquid dalam M3/hr
%wMDEA= input('fraksi MDEA(wt)=');
wMDEA=40;
```

```

wMDEAin=wMDEA/100;
%wPZ= input('fraksi PZ (wt)=');
wPZ=3;
wPZin =wPZ/100;
wH2Oin=1-wMDEAin-wPZin;
MWMDEA= 119; MWCO2=44; MWH2S=34;MWCH4=16;
MWPZ=86; MWH2O=18;
MWG=yCO2in*MWCO2+yH2Sin*MWH2S+yCH4in*MWCH4;
XMDEAin=(wMDEAin/MWMDEA) / (wMDEAin/MWMDEA+wPZin
/MWPZ+wH2Oin/MWH2O);
XPZin=(wPZin/MWPZ) / (wMDEAin/MWMDEA+wPZin/MWPZ+
wH2Oin/MWH2O);
XWin=1-XMDEAin-XPZin;
MWL=XMDEAin*MWMDEA+XPZin*MWPZ+XWin*MWH2O;
XXMDEAin=XMDEAin;
XMDEAHin=0;
XXMDEAHin=XMDEAHin;
XHCO3in=0;
XXHCO3in=XHCO3in;
XHSin=0;
XXHSin=XHSin;
XXPZin=XPZin;
XXWin=XWin;
R=0.0820546; %Konstanta gas dalam
atm.m3/(kmol*K)
RhoMDEA=1041;
RhoH2O=(0.325*0.27^-( (1-
TL/647.13)^0.23)) *1000;
RhoPZ=(0.322*0.30944^-( (1-
TL/661)^0.28571)) *1000;
RhoG=MWG*P / (R*TGG);
RhoG0=MWG / (R*273);
RhoL=1 / (wMDEAin/RhoMDEA+wPZin/RhoPZ+wH2Oin/Rho
H2O);
GG=GV*RhoG0;
LL=LV*RhoL;
GMin=GV*RhoG0/MWG;
LMin=LV*RhoL/MWL;
RGL=GMin/LMin;

```

```

GIN=GMin*10/36;
C=RhoL/MWL;
CMDIN=XMDEAin*C;
iter1=0;
eror1=1;
YYco2out=0.3*YYco2in;
YYh2sout=0.1*YYh2sin;
while eror1>0.001
    iter1=iter1+1;
    YYco2outs=YYco2out;
    YYh2souts=YYh2sout;
    XXMDEA(1)=XXMDEAin-RGL*(YYco2in-
YYco2out+YYh2sin-YYh2sout);
    XXMDEAH(1)=XXMDEAHin+RGL*(YYco2in-
YYco2out+YYh2sin-YYh2sout);
    XXHCO3(1)=XXHCO3in+RGL*(YYco2in-YYco2out);
    XXHS(1)=XXHSin+RGL*(YYh2sin-YYh2sout);
    XXPZ(1)=XXPZin;
    XXW(1)=XXWin;
    for i=1:N
        ii=i;
        YYch4(i)=YYch4in;
        if i==1
            YYco2(1)=0.95*YYco2in;
            YYh2s(1)=0.85*YYh2sin;
        else
            YYco2(i)=0.95*YYco2(i-1);
            YYh2s(i)=0.85*YYh2s(i-1);
        end
    end
    eror2=1;
    iter2=0;
    while eror2>0.001
        iter2=iter2+1;
        if i==1
            YYco2s=YYco2(1);
            YYh2ss=YYh2s(1);
            YYCDM=(YYco2in+YYco2(1))/2;
            YYHSM=(YYh2sin+YYh2s(1))/2;
            YYCH4M=YYch4in;

```



```

YYT=YYCDM+YYHSM+YYCH4M;
YCDM=YYCDM/YYT;
YHSM=YYHSM/YYT;
YCH4M=YYCH4M/YYT;
PCO2=P*YCDM;
PH2S=P*YHSM;

XXMDEA(2)=XXMDEA(1)+RGL*(YYco2in-
YYco2(1)+YYh2sin-YYh2s(1));
XXMDEAH(2)=XXMDEAH(1)-
RGL*(YYco2in-YYco2(1)+YYh2sin-YYh2s(1));
XXHCO3(2)=XXHCO3(1)-
RGL*(YYco2in-YYco2(1));
XXHS(2)=XXHS(1)-RGL*(YYh2sin-
YYh2s(1));
XXPZ(2)=XXPZ(1);
XXW(2)=XXW(1);

TOTXX=XXMDEA(1)+XXHCO3(1)+XXMDEAH(1)+XXHS(1)+X
XPZ(1)+XXW(1);
XMDEA(1)=XXMDEA(1)/TOTXX;
XMDEAH(1)=XXMDEAH(1)/TOTXX;
XHCO3(1)=XXHCO3(1)/TOTXX;
XHS(1)=XXHS(1)/TOTXX;
XPZ(1)=XXPZ(1)/TOTXX;
XW(1)=XXW(1)/TOTXX;
CMD=XMDEA(1)*C;
CMH=XMDEAH(1)*C;
CW=XW(1)*C;
CPZ=XPZ(1)*C;
[
DCO2,DCH4,DH2S,KLCO2,KLH2S,KLCH4,AAA ] =
KLGAS(TLL,TGG,GV,YCDM,YHSM,YCH4M,P);
[KGCO2,KGH2S,KGCH4,MUG,DMCO2]=
KGGAS(GV,YCDM,YCH4M,YHSM,TGG,P);

[K1,K2,K3,K4,K5,kmDEACO2,kPZCO2,kmDEAH2S,kPZH2
S]=KONSTANTA(TLL,TGG,CW);

```

```

[ HCD, HCH4, HHS ]
=HEGAS (TGG, TLL, CMD, CMH, CPZ, CW, K1, K2, K3, K4, K5) ;

MCO2=DCO2* (kmDEACO2*CMD+kPZCO2*CPZ) /KLCO2^2;

MH2S=DH2S* (kmDEAH2S*CMD+kPZH2S*CPZ) /KLH2S^2;
ECO2=sqrt (1+MCO2) ;
EH2S=sqrt (1+MH2S) ;
CCO2eq=CMH^2/ (1000*CMD*K1*CW) ;
CH2Seq=0;

CCO2int= (KGC02*PCO2+ECO2*KLCO2*CCO2eq) / (ECO2*K
LCO2+KGC02*HCD) ;

CH2Sint= (KGH2S*PH2S+EH2S*KLH2S*CH2Seq) / (EH2S*K
LH2S+KGH2S*HHS) ;
EiCO2=1+CMD/CCO2int;
EiH2S=1+CMD/CH2Sint;

RRCO2=ECO2*KLCO2*AAA*VL* (CCO2int-CCO2eq) ;

RRH2S=EH2S*KLH2S*AAA*VL* (CH2Sint-CH2Seq) ;
dYCO2=RRCO2/GIN;
dYH2S=RRH2S/GIN;
YYco2 (1)=YYco2in-RRCO2/GIN;
YYh2s (1)=YYh2sin-RRH2S/GIN;
else
YYco2s=YYco2 (i) ;
YYh2ss=YYh2s (i) ;
YYCDM= (YYco2 (i-1)+YYco2 (i)) /2;
YYHSM= (YYh2s (i-1)+YYh2s (i)) /2;
YYCH4M=YYch4in;
YYT=YYCDM+YYHSM+YYCH4M;
YCDM=YYCDM/YYT;
YHSM=YYHSM/YYT;
YCH4M=YYCH4M/YYT;
PCO2=P*YCDM;
PH2S=P*YHSM;

```

```

XXMDEA (i+1)=XXMDEA (i)+RGL* (YYco2 (i-1) -
YYco2 (i)+YYh2s (i-1)-YYh2s (i)) ;
                XXMDEAH (i+1)=XXMDEAH (i) -
RGL* (YYco2 (i-1)-YYco2 (i)+YYh2s (i-1)-YYh2s (i)) ;
                XXHCO3 (i+1)=XXHCO3 (i) -
RGL* (YYco2 (i-1)-YYco2 (i)) ;
                XXHS (i+1)=XXHS (i) -
RGL* (YYh2s (i-1)-YYh2s (i)) ;
                XXPZ (i+1)=XXPZ (i) ;
                XXW (i+1)=XXW (i) ;

TOTXX=XXMDEA (i) +XXHCO3 (i) +XXMDEAH (i) +XXHS (i) +X
XPZ (i) +XXW (i) ;
                XMDEA (i) =XXMDEA (i) /TOTXX;
                XMDEAH (i) =XXMDEAH (i) /TOTXX;
                XHCO3 (i) =XXHCO3 (i) /TOTXX;
                XHS (i) =XXHS (i) /TOTXX;
                XPZ (i) =XXPZ (i) /TOTXX;
                XW (i) =XXW (i) /TOTXX;
                CMD=XMDEA (i) *C;
                CMH=XMDEAH (i) *C;
                CW=XW (i) *C;
                CPZ=XPZ (i) *C;
                [
DCO2,DCH4,DH2S,KLCO2,KLH2S,KLCH4,AAA ] =
KLGAS (TLL,TGG,GV,YCDM,YHSM,YCH4M,P) ;
                [KGCO2,KGH2S,KGCH4,MUG,DMCO2]=
KGGAS (GV,YCDM,YCH4M,YHSM,TGG,P) ;

                [K1,K2,K3,K4,K5,kmDEACO2,kPZCO2,kmDEAH2S,kPZH2
S]=KONSTANTA ( TLL,TGG,CW) ;
                [ HCD,HCH4,HHS ]
=HEGAS (TGG,TLL,CMD,CMH,CPZ,CW,K1,K2,K3,K4,K5) ;

MCO2=DCO2* (kmDEACO2*CMD+kPZCO2*CPZ) /KLCO2^2;

MH2S=DH2S* (kmDEAH2S*CMD+kPZH2S*CPZ) /KLH2S^2;
                ECO2=sqrt (1+MCO2) ;

```

```

EH2S=sqrt(1+MH2S);
CCO2eq=CMH^2/(1000*CMD*K1*CW);
CH2Seq=0;

CCO2int=(KGC02*PCO2+ECO2*KLCO2*CCO2eq)/(ECO2*K
LCO2+KGC02*HCD);

CH2Sint=(KGH2S*PH2S+EH2S*KLH2S*CH2Seq)/(EH2S*K
LH2S+KGH2S*HHS);
EiCO2=1+CMD/CCO2int;
EiH2S=1+CMD/CH2Sint;

RRCO2=ECO2*KLCO2*AAA*VL*(CCO2int-CCO2eq);

RRH2S=EH2S*KLH2S*AAA*VL*(CH2Sint-CH2Seq);
dYCO2=RRCO2/GIN;
dYH2S=RRH2S/GIN;
YYco2(i)=YYco2(i-1)-RRCO2/GIN;
YYh2s(i)=YYh2s(i-1)-RRH2S/GIN;
end
eror2=abs((YYco2(i)-
YYco2s)/YYco2s)+abs((YYh2s(i)-YYh2ss)/YYh2ss);
if iter2==100
eror2=0.0000001;
end
end
end
YYco2out=YYco2(N);
YYh2sout=YYh2s(N);
eror1=abs((YYco2out-
YYco2outs)/YYco2outs)+abs((YYh2sout-
YYh2souts)/YYh2souts);
if iter1==100
eror1=0.0000001;
end
end
RemCO2=(-YYco2(N)+YYco2in)/YYco2in;
RemH2S=(-YYh2s(N)+YYh2sin)/YYh2sin;
disp(['Suhu Liquid (K)=',num2str(TLIN)]);

```

```

disp(['Suhu Gas (K)=', num2str(TGIN)]);
disp(['Tekanan Operasi (atm)=', num2str(P)]);
disp(['Konsentrasi MDEA
(%wt)=', num2str(wMDEA)]);
disp(['Konsentrasi PZ (%wt)=', num2str(wPZ)]);
disp('          Distribusi Komponen
pada tiap tray ');
disp('_____');
disp('_____');
disp(['   Tray ke-   ', '   CO2   ', '   H2S
', '   CH4   ', '   MDEA   ', '   MDEAH', '
HCO3', '   HS' ]);
disp('_____');
disp('_____');
disp(['   1           ', num2str(YYco2(1)), '
', num2str(YYh2s(1)), '
', num2str(YYch4(1)), '
', num2str(XXMDEA(1)), '
', num2str(XXMDEAH(1)), '
', num2str(XXHCO3(1)), '
', num2str(XXHS(1))] );
disp(['   2           ', num2str(YYco2(2)), '
', num2str(YYh2s(2)), '
', num2str(YYch4(2)), '
', num2str(XXMDEA(2)), '
', num2str(XXMDEAH(2)), '
', num2str(XXHCO3(2)), '
', num2str(XXHS(2))] );
disp(['   3           ', num2str(YYco2(3)), '
', num2str(YYh2s(3)), '
', num2str(YYch4(3)), '
', num2str(XXMDEA(3)), '
', num2str(XXMDEAH(3)), '
', num2str(XXHCO3(3)), '
', num2str(XXHS(3))] );
disp(['   4           ', num2str(YYco2(4)), '
', num2str(YYh2s(4)), '

```

```

',num2str(YYch4(4)), '
',num2str(XXMDEA(4)), '
',num2str(XXMDEAH(4)), '
',num2str(XXHCO3(4)), '
',num2str(XXHS(4))]);
disp(['      5      ',num2str(YYco2(5)), '
', num2str(YYh2s(5)), '
',num2str(YYch4(5)), '
',num2str(XXMDEA(5)), '
',num2str(XXMDEAH(5)), '
',num2str(XXHCO3(5)), '
',num2str(XXHS(5))]);
disp(['      6      ',num2str(YYco2(6)), '
', num2str(YYh2s(6)), '
',num2str(YYch4(6)), '
',num2str(XXMDEA(6)), '
',num2str(XXMDEAH(6)), '
',num2str(XXHCO3(6)), '
',num2str(XXHS(6))]);
disp('
_____
_____
');
disp(['%Removal CO2=',num2str(RemCO2)]);
disp(['%Removal H2S=',num2str(RemH2S)]);

```

**%fungsi dari nilai konstanta laju reaksi dan data kesetimbangan**

```

function
[K1,K2,K3,K4,K5,kmDEACO2,kPZCO2,kmDEAH2S,kPZH2S]=KONSTANTA( TLL,TGG,CW)
TI=(TGG+TLL)/2;% interface temperature in tower(K)
TF=(TI+TLL)/2;%film temperture(K)
K2=((exp((-12091.1/TF)-(36.7816*log(TF))+235.482)))*CW;%equilibrium constant for rection (2.57)(-)
K3=((exp((-12431.7/TF)-(35.4819*log(TF))+220.067))/1000)*CW;%equilibr ium constant for rection (mole/cm3)(2.58)

```

```

K4=((exp((-423.98/TF)-
9.4165))/1000)*CW;%equilibrium constant for
rection (mole/cm3) (2.59)
K5=((exp((-13445.9/TF)-
(22.4773*log(TF))+140.932))/1000)*CW;%equilibr
ium constant for rection (2.60) (mole/cm3)
K1=1000*K2/K4;%equilibrium constant for
rection (cm3/mole) (2.56)
%kMDEACO2=(1.78*10^10*exp(-
6441.9/TF))*1000;%reaction rate constant
(cm3/mole.s)
kMDEACO2=(5.86*10^6*exp(-
3984/TF))*1000;%reaction rate constant
(cm3/mole.s)
kPZCO2=(2.81*10^10*exp(-
5800/TF))*1000;%reaction rate constant
(cm3/mole.s)
kMDEAH2S=10*kMDEACO2;
kPZH2S=10*kPZCO2;
%fungsi transfer massa sisi tahanan gas
function [ KGCO2,KGH2S,KGCH4 ,MUG, DMCO2] =
KGGAS( GV,YCDM,YCH4M,YHSM,TGG,P )
GVop=GV*(1/P)*(TGG/273);
D = 10; %diameter tray dalam cm (data 10 cm)
AK = 3.14*D^2/4; %luas permukaan tray dalam
cm2
hw = 4 ; %tinggi weir dalam cm
TS = 30; %tray spacing dalam cm
R=82.057;%gas constant(cm3.atm/mol.k)
%Gas stream
%MOLECULAR WEIGHT
MWCD=44;%molecular weight CO2(gr/mol)
MWCH4=16;%molecular weight N2(gr/mol)
MWHS=34;%molecular weight CH4(gr/mol)
MWG=YCDM*MWCD+YCH4M*MWCH4+YHSM*MWHS;
%moolecular volume (cm3/mol)
VCDG=26.9;
VCH4G=24.42;
VHSG=20.96;

```

```

%viscosity ( gr/cm.s)
MUCD=(10^(578.08*(1/TGG-1/185.24)))/100;
MUCH4=(10^(90.30*(1/TGG-1/46.14)))/100;
MUHS=(10^(114.14*(1/TGG-1/57.60)))/100;
%MUHS=(10^(114.14*(1/TGG-1/57.60)))/100;
YMCD=YCDM*MWCD/MWG;
YMCH4=YCH4M*MWCH4/MWG;
YMHS=YHSM*MWHS/MWG;
VL = (3.14*D^2/4)*0.67*hw;
VGIN=GVop*10000/36;% laju alir volumetrik gas
dalam cm3/detik
u=VGIN/AK;
hL=VL/AK;
MUG=(MUCD*YMCD+MUCH4*YMCH4+MUHS*YMHS);%gas
viscosity (cps , gr/cm.s)
ut0 = 26.5 ; %velocity of rise of the bubbles
in the froth dalam cm/det
ut=ut0*(30/P)^2;
RESIDTIME=hw/ut; %residence time dalam det
DBUBB0 = 0.5; %dia bubble dalam cm
DBUBB = DBUBB0*(30/P);
at = 6/DBUBB;
%koefisien perpind massa dalam gas dalam
gmol/(cm2 det atm,(Taylor, hal 346)
% CO2
DGCDCH4=10^-
3*TGG^1.75*(1/MWCD+1/MWCH4)^0.5/(P*((VCDG^(1/3)
))+VCH4G^(1/3))^2);%diffusivity of CO2 against
CH4 (cm2/s)
DGCDHS=10^-
3*TGG^1.75*(1/MWCD+1/MWHS)^0.5/(P*((VCDG^(1/3)
))+VHSG^(1/3))^2);%diffusivity of CO2 against
H2S (cm2/s)
DMCO2=(1-
YCDM)/(YCH4M/DGCDCH4+YHSM/DGCDHS);%diffusivity
of CO2 against gas mixer (cm2/s)
KGCO21=8.9*u^0.25*hL^-0.5*DMCO2^0.5;
KGCO2=KGCO21/(R*TGG);
% H2S

```



```

DGHSCD=10^-
3*TGG^1.75*(1/MWHS+1/MWCD)^0.5/(P*((VHSG^(1/3)
)+VCDG^(1/3))^2);%diffusivity of H2S against
CO2 (cm2/s)
DGHSC4=10^-
3*TGG^1.75*(1/MWCH4+1/MWHS)^0.5/(P*((VCH4G^(1/
3))+VHSG^(1/3))^2);%diffusivity of H2S against
CH4 (cm2/s)
DMH2S=(1-
YHSM)/(YCDM/DGHSCD+YCH4M/DGHSC4);%diffusivity
of N2 against gas mixer (cm2/s)
KGH2S1=25.3*u^0.25*hL^-0.5*DMH2S^0.5;
KGH2S=KGH2S1/(R*TGG);
% CH4
DGCH4HS=10^-
3*TGG^1.75*(1/MWHS+1/MWCH4)^0.5/(P*((VHSG^(1/3)
))+VCH4G^(1/3))^2);%diffusivity of CH4 against
H2S (cm2/s)
DGCH4CD=10^-
3*TGG^1.75*(1/MWCH4+1/MWCD)^0.5/(P*((VCH4G^(1/
3))+VCDG^(1/3))^2);%diffusivity of CH4 against
CO2 (cm2/s)
DMCH4=(1-
YCH4M)/(YHSM/DGCH4HS+YCDM/DGCH4CD);%diffusivit
y of CH4 against gas mixer (cm2/s)
KGCH41=7*u^0.25*hL^-0.5*DMCH4^0.5;
KGCH4=KGCH41/(R*TGG);

```

### **%fungsi transfer massa dari sisi tahanan liquid**

```

function [
DCO2,DCH4,DH2S,KLCO2,KLH2S,KLCH4,AAA ] =
KLGAS(TLL,TGG,GV,YCDM,YHSM,YCH4M,P)
TI=(TGG+TLL)/2;%interface temperature in the
tower(K)
TF=(TI+TLL)/2;%film temperature in the
tower(K)
GVop=GV*(1/P)*(TGG/273);
wMDEAin= 0.4;

```

```

wPZin = 0.03;
wH2Oin=1-wMDEAin-wPZin;
MWMDEA= 119; MWCO2=44; MWH2S=34;MWCH4=16;
MWPZ=86; MWH2O=18;
MWG=YCDM*MWCO2+YHSM*MWH2S+YCH4M*MWCH4;
XMDEAin=(wMDEAin/MWMDEA) / (wMDEAin/MWMDEA+wPZin
/MWPZ+wH2Oin/MWH2O);
XPZin=(wPZin/MWPZ) / (wMDEAin/MWMDEA+wPZin/MWPZ+
wH2Oin/MWH2O);
XH2Oin=1-XMDEAin-XPZin;
MWL=XMDEAin*MWMDEA+XPZin*MWPZ+XH2Oin*MWH2O;
XXMDEAin=XMDEAin;
XXPZin=XPZin;
XXH2Oin=XH2Oin;
R=0.0820546; %Konstanta gas dalam
atm.m3/(kmol*K)
g=980; % percepatan gravitasi dalam cm/s2
RhoMDEA=1041;
RhoH2O= 1000;
RhoPZ= 1100;
RhoG=MWG*P/(R*TGG);
RhoL=1/(wMDEAin/RhoMDEA+wPZin/RhoPZ+wH2Oin/Rho
H2O);
VOLGIN=GVop*10000/36;% laju alir volumetrik
gas dalam cm3/detik
%column details
N = 6; %jumlah tray
D = 10; %diameter tray dalam cm (data 220 cm)
AK = 3.14*D^2/4; %luas permukaan tray dalam
cm2
hw = 4 ; %tinggi weir dalam cm
TS = 30; %tray spacing dalam cm
%liquid stream
VL = (3.14*D^2/4)*0.67*hw; %volume liquid
dalam tray (percent of jet flooding act/max =
67%)
%molecular volume (cm3/gmol)
VCD=34;
VCH4=29.6; %14.8+4*3.7

```

```

VHS=32.9;
PHI=2.6; %assosiation factor
%MWL=18; %molecular weight (gr/gmol)
MUA=3*0.003393*exp(1693.86/TF); %viscosity
(gr/m.s)
%Diffusivity (cm2/s)
DCO2=0.000000074*TF*(PHI*MWH2O)^0.5/(MUA*VCD^0
.6);
DCH4=0.000000074*TF*(PHI*MWH2O)^0.5/(MUA*VCH4^
0.6);
DH2S=0.000000074*TF*(PHI*MWH2O)^0.5/(MUA*VHS^0
.6);
%memperkirakan tegangan permukaan
VH2O = 18 ; %dalam cm3/g-mol
VMDEA = 147 ; % metode aditif
WTAMIN = (0.6/18) + (0.4/119);
XMDEA = (0.4/119)/WTAMIN;
XH2O = (0.6/18)/ WTAMIN;
VT = XH2O*VH2O+XMDEA*VMDEA;
PSIH2O = XH2O*VH2O/VT;
PSIMDEA = XMDEA*VMDEA/VT;
ETAH2O = 71.18; %tegangan permukaan H2O murni
dalam dyne/cm
ETAMDEA = 18; %tegangan permukaan MDEA murni
dalam dyne/cm
ETA4 = PSIH2O*ETAH2O^(1/4) +
PSIMDEA*ETAMDEA^(1/4);
ETA = ETA4^4 ; %tegangan permukaan laruta MDEA
dalam dyne/cm
%menentukan a (cm2/cm3) sieve tray
NHOLES = 44 ; %jumlah lubang dalam tray
Dhole = 0.4 ; %dia hole dalam cm
MIUM = 0.01*MUA; % viskositas larutan MDEA
dalam g/det.cm (Poise)
u = VOLGIN/AK; %kec linier dalam tray cm/det
ut0 = 26.5 ; %velocity of rise of the bubbles
in the froth dalam cm/det pres 30 atm
ut=ut0*(30/P)^2;

```

```

AAA
=0.38*((u/ut)^0.775)*(u*0.001*RhoL/(NHOLES*DHO
LE*MIUM))^0.125*(g*0.001*RhoL/(DHOLE*ETA))^(1/
3); %dalam cm2/cm3, Danckwerts hal 226
%menghitung koefisien transfer massa sisi
liquid dalam cm/det
KLCO2 =
0.31*(1000*g*MIUM/RhoL)^(1/3)*(DCO2*0.001*RhoL
/MIUM)^(2/3);
KLH2S =
0.31*(1000*g*MIUM/RhoL)^(1/3)*(DH2S*0.001*RhoL
/MIUM)^(2/3);
KLCH4 =
0.31*(1000*g*MIUM/RhoL)^(1/3)*(DCH4*0.001*RhoL
/MIUM)^(2/3);

```

#### **%fungsi nilai kelarutan**

```

function [ HCD,HCH4,HHS ]
=HEGAS(TGG,TLL,CMD,CMH,CPZ,CW,K1,K2,K3,K4,K5)
TI=(TGG+TLL)/2;%interface temperature in the
tower(K)
TF=(TI+TLL)/2;%film temperature in the
tower(K)
CMD0=CMD;%MDEA concentration in liquid feed
stream (kmol/m3)
CMH0=CMH;%R-MDEA concentration in liquid feed
stream (kmol/m3)
CW0=CW;%water concentration in liquid feed
stream (kmol/m3)
CPZ0=CPZ;%k concentration in liquid feed
stream (kmol/m3)
CCO2=CMH^2/(CMD*K1*CW);
CHCO3=CMH0;%HCO3 concentration in liquid feed
stream (kmol/m3)
CH=(K2*CCO2*CW0)/(CHCO3);%H concentration in
liquid feed stream (kmol/m3)
CCO3=K3*CHCO3/(CH);%CO3 concentration in
liquid feed stream (kmol/m3)

```

```

COH=K5*CW0/CH;%OH concentration in liquid
feed stream (kmol/m3)
%henry inverse constant pure water at
298 (kmole/m3.atm)
KHOCD=3.5*10^-2;
KHOCH4=1.4*10^-3;
KHOHS=1*10^-1;
%enthalpy part constant(k)
dCD=2400;
dCH4=1600;
dHS=2000;
%henry inverse constant pure water at
temperature (T) (kmole/m3.atm)
KHCD=KHOCD*exp(dCD*((1/TF)-(1/298)));
KHCH4=KHOCH4*exp(dCH4*((1/TF)-(1/298)));
KHHS=KHOHS*exp(dHS*((1/TF)-(1/298)));
%henry constant pure water at temperature
(T) (m3.pa/kmole)
HWCD=101325/KHCD;
HWCH4=101325/KHCH4;
HWHS=101325/KHHS;
%hG at T=298 K(m3/kmole)
HGOCD=-1.72*10^-5;
HGOCH4=-1*10^-6;
HGOHS=-2.2*10^-6;
%parameter hT of gas (m3/kmole.K)
HTCD=-3.38*10^-7;
HTCH4=-6.05*10^-7;
HTHS=-5.24*10^-7;
%hG,o of gas at temperture T(m3/kmole)
HGCD=HGOCD+HTCD*(TF-298.15);
HGCH4=HGOCH4+HTCH4*(TF-298.15);
HGHS=HGOHS+HTHS*(TF-298.15);
HMHPLUS=0.041;% ion plus concentration,
MDEAH+ (m3/kmol)
HKPLUS=0.092;
HCO3MIN=0.1423;%ion plus concentration, CO3-
(m3/kmol)

```

```

HHCO3MIN=0.0967;%ion plus concentration,
HCO3- (m3/kmol)
HOHMIN=0.061;
HPZMIN=0.0413;
%hI constant in MDEA(m3/kmol)
SUMCD=(HMHPLUS+HGCD)*CMH+(HCO3MIN+HGCD)*CCO3+(
HOHMIN+HGCD)*COH+(HHCO3MIN+HGCD)*CHCO3+(HPZMIN
+HGCD)*CPZ;
SUMCH4=(HMHPLUS+HGCH4)*CMH+(HCO3MIN+HGCH4)*CCO
3+(HHCO3MIN+HGCH4)*CHCO3+(HOHMIN+HGCH4)*COH+(H
PZMIN+HGCH4)*CPZ;
SUMHS=(HMHPLUS+HGHS)*CMH+(HCO3MIN+HGHS)*CCO3+(
HHCO3MIN+HGHS)*CHCO3+(HOHMIN+HGHS)*COH+(HPZMIN
+HGHS)*CPZ;
%henry constant (pa.m3/kmol)
HCDA=HWCD/10^(SUMCD);
HCH4A=HWCH4/10^(SUMCH4);
HHSA=HWHS/10^(SUMHS);
%henry constant (atm.cm3/mol)
HCD=HCDA*(10^6/(101325*10^3));
HCH4=HCH4A*(10^6/(101325*10^3));
HHS=HHSA*(10^6/(101325*10^3));

```

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

# **APENDIKS C** **DATA HASIL SIMULASI**

Tabel C.1 Pengaruh Suhu Liquid

T(K)	PZ 0%		PZ 1%		PZ 3%		PZ 5%	
	%R	%R	%R	%R	%R	%R	%R	%R
	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
303,00	48,92	96,28	53,01	96,99	57,73	97,62	60,57	97,93
308,00	50,58	96,69	54,51	97,29	59,04	97,83	61,75	98,10
313,00	52,18	97,04	55,94	97,55	60,28	98,02	62,87	98,26
318,00	53,72	97,34	57,31	97,78	61,45	98,19	63,93	98,39
323,00	55,20	97,61	58,62	97,98	62,58	98,33	64,94	98,51
328,00	56,61	97,84	59,87	98,16	63,64	98,47	65,90	98,62
333,00	57,96	98,04	61,06	98,31	64,66	98,58	66,80	98,72
343,00	60,48	98,36	63,28	98,57	66,54	98,78	68,48	98,89



Tabel C.2 Pengaruh Tekanan Operasi

P(atm)	PZ 0%		PZ 1%		PZ 3%		PZ 5%	
	%R	%R	%R	%R	%R	%R	%R	%R
	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
10	10,19	48,53	11,75	51,31	13,99	55,54	15,62	58,07
15	17,64	66,95	20,01	69,46	23,23	73,00	25,45	74,97
20	25,27	79,17	28,26	81,13	32,13	83,72	34,71	85,11
25	32,69	87,03	36,09	88,45	40,35	90,26	43,09	91,20
30	39,70	92,00	43,35	92,99	47,78	94,19	50,55	94,81
35	46,21	95,10	49,97	95,77	54,40	96,57	57,11	96,96
40	52,18	97,04	55,94	97,48	60,27	97,99	62,87	98,24
50	62,49	98,95	66,04	99,13	69,96	99,33	72,23	99,43
60	70,81	99,65	73,98	99,72	77,38	99,79	79,29	99,82

Tabel C.3 Pengaruh Konsentrasi MDEA (% wt)

MDEA (% wt)	PZ 0%		PZ 1%		PZ 3%		PZ 5%	
	%R	%R	%R	%R	%R	%R	%R	%R
	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
20	43,99	95,16	51,92	96,94	58,54	97,83	61,89	98,16
25	46,93	95,89	53,17	97,12	59,04	97,88	62,16	98,18
30	49,10	96,34	54,23	97,26	59,49	97,92	62,41	98,20
35	50,80	96,66	55,15	97,38	59,90	97,96	62,65	98,22
40	52,18	96,89	55,94	97,48	60,28	97,99	62,87	98,24
45	53,34	97,08	56,64	97,57	60,62	98,03	63,07	98,26
50	54,32	97,22	57,26	97,64	60,94	98,06	63,27	98,27

Tabel C.4 Pengaruh konsentrasi Piperazine (% wt)

PZ (% wt)	%R CO <sub>2</sub>	%R H <sub>2</sub> S
0	43,90	96,89
1	55,94	97,48
2	58,44	97,79
3	60,28	97,99
4	61,71	98,13
5	62,87	98,24

Tabel C.5 Distribusi Komponen tiap tray

Tray ke—	fraksi mol CO <sub>2</sub>	fraksi mol H <sub>2</sub> S	fraksi mol MDEA	fraksi mol MDEAH <sup>+</sup>	fraksi mol HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	fraksi mol HS <sup>-</sup>
1	0,0085	0,0051	0,0604	0,0347	0,0132	0,0215
2	0,0073	0,0026	0,0743	0,0207	0,0099	0,0108
3	0,0062	0,0014	0,0824	0,0126	0,0072	0,0054
4	0,0054	0,0007	0,0875	0,0075	0,0049	0,0026
5	0,0046	0,0004	0,0908	0,0042	0,0030	0,0012
6	0,0040	0,0002	0,0932	0,0018	0,0014	0,0004

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

## RIWAYAT PENULIS



**Naufal Hilmy Alhady**, lahir pada 12 April 1994 di kota Depok, Jawa Barat. Jenjang pendidikan formal yang telah dijalani yaitu setelah lulus SMA pada tahun 2011, penulis melanjutkan pendidikan Diploma di Universitas Diponegoro, kemudian melanjutkan program ekstensi di Jurusan Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama masa kuliah, penulis telah melakukan kerja praktik di PT Indonesia Power UJP 2 Pelabuhan Ratu, Jawa Barat. Untuk menyelesaikan tugas akhir penulis memilih Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa. Keinginan untuk lebih memahami dan menerapkan ilmu yang didapat selama kuliah, mendorong penulis untuk mengambil Tugas Pra Desain Pabrik “*Diethyl Carbonate* (DEC) dari *Carbon Dioxide* dan *Ethanol*” dan tugas akhir yang telah ditulis pada buku ini. Untuk kepentingan penelitian, penulis dapat dihubungi pada alamat email [alhady.naufal@gmail.com](mailto:alhady.naufal@gmail.com)

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

## RIWAYAT PENULIS



**Mochammad Yoga Arifin**, lahir pada 9 Desember 1993 di kota Bandung, Jawa Barat. Menempuh pendidikan formal di SD Sosial 1 Cimahi tahun 1999-2005, SMPN 2 Cimahi tahun 2005-2008, SMAN 3 Cimahi tahun 2008-2011, penulis kemudian melanjutkan pendidikan Diploma di Universitas Padjadjaran tahun 2011-2014, kemudian pada tahun 2015 melanjutkan program Lintas Jalur di Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama masa kuliah, penulis pernah berkesempatan kerja praktik di PT Petrokimia Gresik, Jawa Timur tahun 2016. Untuk menyelesaikan tugas akhir penulis memilih Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa di bawah bimbingan Prof. Dr. Ir. Ali Altway, M.Sc. dan Dr. Ir. Susianto, DEA. Keinginan untuk lebih memahami dan menerapkan ilmu yang didapat selama kuliah, mendorong penulis untuk mengambil Tugas Pra Desain Pabrik “*Diethyl Carbonate* (DEC) dari *Carbon Dioxide* dan *Ethanol*” dan tugas akhir yang telah ditulis pada buku ini. Alamat email penulis: [myogaarifin@gmail.com](mailto:myogaarifin@gmail.com)

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)